

Automatické řízení ventilace a klimatizace v budově s využitím fuzzy logiky

Ventilation and Air Conditioning with Automatic Control in the building using
Fuzzy Logic

Filip Tomanec

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Macháček, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací řídicího systému pro regulaci ventilace a klimatizace v kancelářské budově. Teoretická část se skládá z rozboru problematiky kvality vzduchu, kritérii kvality vzduchu a možnostmi měření. Dále obsahuje rozbor problematiky fuzzy rozhodovacího procesu a návrh systému pro automatické řízení. Hlavním cílem práce je realizace automatického systému regulace s využitím mikrokontroléru ESP a senzoriky Sensirion, možností uživatelského nastavení požadovaných hodnot a ukládáním historie stavů a naměřených hodnot. Uživatelské nastavení je realizováno pomocí webového rozhraní s možností monitorování aktuálních hodnot.

Klíčová slova

řízení; regulace; fuzzy; klimatizace; ventilace; ESP; Sensirion; bakalářská práce

Abstract

The bachelor's thesis deals with the design and implementation of a control system for the regulation of ventilation and air conditioning in an office building. The theoretical part consists of an analysis of air quality issues, air quality criteria and measurement options. It also contains an analysis of the issues of fuzzy decision-making process and design of a system for automatic control. The main goal of the work is the implementation of an automatic control system using the ESP microcontroller and Sensirion sensors, the possibility of user setting the required values and storing the history of states and measured values. User settings are implemented using a web interface with the ability to monitor current values.

Keywords

control; regulation; fuzzy; air conditioning; ventilation; ESP; Sensirion; Bachelor thesis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce Ing. Zdeňkovi Macháčkovi, Ph.D. za přínosné informace, vedení a pomoc při tvorbě mé bakalářské práce.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Seznam použitých symbolů a zkratk | 6 |
| Seznam obrázků | 8 |
| Seznam tabulek | 10 |
| 1 Úvod | 11 |
| 2 Rozbor problematiky metod regulace ventilace a klimatizace | 13 |
| 2.1 Problematika kvality vzduchu v uzavřených prostorech | 13 |
| 2.2 Kritéria kvality vzduchu | 13 |
| 2.3 Senzorika pro měření kvality ovzduší | 15 |
| 2.4 Klimatizování uzavřených prostor | 19 |
| 3 Rozbor problematiky fuzzy rozhodovacího procesu | 20 |
| 3.1 Princip mechanismu fuzzy systému | 20 |
| 3.2 Fuzzyfikace | 21 |
| 3.3 Inference | 22 |
| 3.4 Defuzzyfikace | 22 |
| 3.5 Příklad rozhodování fuzzy systému | 22 |
| 4 Návrh systému pro automatické řízení ventilace a klimatizace s ukládáním historie stavů a naměřených hodnot | 25 |
| 4.1 Použité komponenty navrhovaného systému | 26 |
| 4.2 Návrh rozmístění modulů v budově | 29 |
| 4.3 Návrh zapojení jednotlivých modulů | 30 |
| 4.4 Návrh komunikace mezi mikrokontroléry | 32 |
| 4.5 Návrh fuzzy systému pro regulaci | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Realizace systému pro automatické řízení ventilace a klimatizace s využitím mikrokontroléru ESP a senzoriky Sensirion | 38 |
| 5.1 | Popis softwarové implementace mikrokontrolérů ESP32 | 38 |
| 5.2 | Ukládání historie stavů a naměřených hodnot | 44 |
| 5.3 | Návrh a realizace desky plošných spojů | 46 |
| 5.4 | Uživatelské rozhraní pro monitorování a nastavení ventilace a klimatizace. | 48 |
| 6 | Měření a analýza skutečných parametrů systému | 52 |
| 7 | Závěr | 55 |
| | Literatura | 56 |
| | Přílohy | 57 |
| A | Schéma zapojení a deska plošných spojů | 58 |
| B | Seznam externích příloh | 60 |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|--------|---|
| NDIR | – Non-Dispersive InfraRed |
| IDE | – vývojové prostředí (Integrated Development Environment) |
| I2C | – sběrnice (Inter-Integrated Circuit) |
| CNSLD | – nespecifikovaná chronická plicní nemoc (Chronic Non-Specific Lung Disease) |
| IR | – infračervené záření (Infrared Radiation) |
| VAV | – variabilní průtok vzduchu (Variable Air Volume) |
| VRV | – variabilní průtok chladiva (Variable Refrigerant Volume) |
| IoT | – internet věcí (Internet of Things) |
| BLE | – Bluetooth (Bluetooth Low Energy) |
| ADC | – analogově digitální převodník (Analog-to-Digital Converter) |
| DAC | – digitálně analogový převodník (Digital-to-Analog Converter) |
| UART | – sběrnice (Universal asynchronous receiver-transmitter) |
| SPI | – sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface) |
| I2S | – sběrnice (Inter-IC Sound) |
| USB | – univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus) |
| HVAC | – systém topení, klimatizace a vzduchotechniky v interiérech budov (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) |
| CMOS | – způsob vytváření logických členů (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) |
| OLED | – technologie displeje (Organic Light-Emitting Diode) |
| SCL | – hodinový signál (Synchronous Clock) |
| SDA | – datový kanál (Synchronous Data) |
| UML | – grafický jazyk pro vizualizaci programových systémů (Unified Modeling Language) |
| VCS | – verzovací systém (Version Control System) |
| HTTP | – internetový protokol (Hypertext Transfer Protocol) |
| SPIFFS | – souborový systém (Serial Peripheral Interface Flash File System) |

| | |
|------|---|
| eFFL | – knihovna pro fuzzy systémy (Embedded Fuzzy Logic Library) |
| HTML | – jazyk pro tvorbu webových stránek (Hypertext Markup Language) |
| CSS | – kaskádové styly (Cascading Style Sheets) |

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Schéma CO ₂ senzoru založeného na chemické metodě | 16 |
| 2.2 | Schéma CO ₂ senzoru založeného na NDIR | 17 |
| 3.1 | Struktura fuzzy systému [12] | 21 |
| 3.2 | Přiřazení stupně příslušnosti μ k proměnné teplotě[2] | 21 |
| 3.3 | Míry příslušnosti pro parametr 1. | 23 |
| 3.4 | Míry příslušnosti pro parametr 2. | 23 |
| 3.5 | Vyhodnocení výstupu pomocí metody těžiště | 24 |
| 4.1 | Návrh systému a propojení hardwaru | 25 |
| 4.2 | Vývojová deska s modulem ESP32 | 26 |
| 4.3 | Senzorový modul Sensirion SCD30 | 27 |
| 4.4 | OLED Displej | 28 |
| 4.5 | Senzor HTU21D | 28 |
| 4.6 | Senzor BH1750 | 29 |
| 4.7 | Návrh umístění modulů v budově | 29 |
| 4.8 | Zapojení měřicího modulu (Slave) | 30 |
| 4.9 | Zapojení řídicího modulu (Master) | 31 |
| 4.10 | Schéma komunikace ESP-NOW | 32 |
| 4.11 | UML diagram znázorňující princip komunikace, čtení ze senzorů a ukládání naměřených dat | 33 |
| 4.12 | Navržený fuzzy systém v softwaru Matlab | 34 |
| 4.13 | Fuzzyfikace vstupu teploty | 35 |
| 4.14 | Fuzzyfikace vstupu CO ₂ | 35 |
| 4.15 | Fuzzyfikace výstupu klimatizace | 36 |
| 4.16 | Fuzzyfikace výstupu ventilace | 36 |
| 5.1 | UML diagram programu řídicího mikrokontroléru | 39 |
| 5.2 | UML diagram programu měřicího mikrokontroléru | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.3 | Schéma komunikace s databází | 45 |
| 5.4 | Schéma zapojení | 46 |
| 5.5 | Navržená DPS | 46 |
| 5.6 | Realizované DPS dle vytvořeného návrhu | 47 |
| 5.7 | Foto výsledného systému | 47 |
| 5.8 | Popis úvodní obrazovky | 48 |
| 5.9 | Obrazovka s ovládacími prvky, vstupními a výstupními hodnotami | 49 |
| 5.10 | Podrobný popis ovládacího panelu jedné z místností | 49 |
| 5.11 | Obrazovka s grafy | 50 |
| 5.12 | Detail obrazovky s grafy - možnosti nastavení grafů, export dat | 50 |
| 5.13 | Obrazovka s nastavením | 51 |
| 6.1 | Graf měření reakce klimatizace | 53 |
| 6.2 | Graf měření reakce ventilace | 54 |
| A.1 | Deska plošných spojů | 58 |
| A.2 | Schéma zapojení | 59 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Hraniční hodnoty koncentrace oxidu uhličitého.[7] | 14 |
| 2.2 | Zdroje vodní páry v bytě.[11] | 18 |
| 3.1 | Obecná soustava pravidel[2] | 22 |
| 3.2 | Míry příslušnosti k slovním proměnným | 23 |
| 4.1 | Specifikace zakoupené vývojové desky | 26 |
| 4.2 | Parametry sensorového modulu Sensirion SCD30 | 27 |
| 4.3 | Parametry senzoru HTU21D | 28 |
| 4.4 | Parametry senzoru BH1750[17] | 29 |
| 4.5 | Vytvořené pravidla | 37 |
| 5.1 | Vytvořená databázová tabulka a její atributy | 45 |
| 6.1 | Měření reakce klimatizace | 52 |
| 6.2 | Měření reakce ventilace | 53 |

Kapitola 1

Úvod

Automatizace procesů je v dnešní době velmi žádaná a někdy až nezbytná. Nahrazuje lidské zdroje a tím šetří čas i finanční prostředky. Nedostatečné větrání a přísun kvalitního vzduchu je jednou z příčin nekvalitního prostředí budov a má negativní vliv na lidské zdraví. V minulosti však lidé problém s větráním neměli, protože se používala špatně těsnící okna a dveře, takže větrání probíhalo nepřetržitě. V současnosti už je situace opačná, ve většině obytných a administračních budovách máme prostory tak utěsněné, že je nutné pravidelně větrat a nebo zajistit dostatečný přísun kvalitního vzduchu pomocí vzduchotechniky. Proto se tato práce zabývá návrhem a realizací řídicího systému pro regulaci ventilace a klimatizace v kancelářské budově.

Teoretická část práce se zabývá rozbořem problematiky kvality vzduchu a jednotlivými kritérii v uzavřených prostorech. Jelikož je určování kvality vzduchu ve vnitřních prostorách většinou velmi komplikované, zabývá se práce především oxidem uhličitým a měřením jeho koncentrace v ovzduší a také měřením teploty a vlhkosti. Tyto veličiny jsou základní pro stanovení kvality vzduchu v prostoru a zároveň jsou poměrně snadno měřitelné. Teoretická část je doplněna o jednotlivé metody měření kvality ovzduší a principy funkce vybraných senzorů. V neposlední řadě práce obsahuje rozbor problematiky fuzzy rozhodovacího procesu, princip jeho mechanismu a ukázkový příklad, který popisuje principy rozhodování fuzzy systému.

V praktické části práce je popsán samotný návrh a realizace specifického systému, který umožňuje automatickou regulaci klimatizace a ventilace s využitím mikrokontroléru ESP a senzoriky Sensirion. Jedná se o systém, který měří kvalitu vzduchu ve čtyřech místnostech a na základě naměřených dat reguluje intenzitu výkonu centrální ventilace a klimatizace. Systém se skládá z pěti ESP, z toho čtyři ESP jsou nastaveny jako „Slave“, takže pouze sbírají hodnoty ze senzorů, a páté ESP je nastaveno jako „Master“, tedy jako hlavní, které sbírá data od ostatních ESP a obsahuje řídicí logiku pro ovládání centrální ventilace. Mikrokontroléry jsou naprogramovány za pomoci vývojového prostředí Visual Code s doplňkem PlatformIO a programovacího jazyka Wiring. Jednotlivé komponenty komunikují mezi sebou přes sběrnici I2C a jsou napájeny napětím 3,3V. Systém disponuje možností monitorování aktuálních hodnot a nastavení požadovaných hodnot, které je realizováno

pomocí webového rozhraní. Ukládání historie stavů a naměřených hodnot je provedeno za pomoci databáze MySQL, která je dostupná z veřejné internetové domény.

Špatná kvalita vzduchu, především vysoká koncentrace CO_2 v domácnostech nebo v kancelářích může způsobovat zhoršení soustředění, bolesti hlavy nebo zdravotní problémy. Správná regulace přispívá také k energeticky úspornému provozu a tím redukuje zátěž na životní prostředí. Vhodně navržená regulace je také předpokladem pro nízké provozní náklady.

Kapitola 2

Rozbor problematiky metod regulace ventilace a klimatizace

Kapitola se zabývá rozбором problematiky kvality vzduchu, popisem jednotlivých senzorů pro měření kvality vzduchu a možnostmi klimatizování v uzavřených prostorech.

2.1 Problematika kvality vzduchu v uzavřených prostorech

Nedostatečné větrání a přísun kvalitního vzduchu je jednou z příčin nekvalitního prostředí budov a má negativní vliv na lidské zdraví. V minulosti však lidé problém s větráním neměli, protože se používala špatně těsnící okna a dveře, takže větrání probíhalo nepřetržitě. V současnosti už je situace opačná a ve většině obytných a administrativních budovách máme prostory tak utěsněné, že je nutné pravidelně větrat a nebo zajistit dostatečný přísun kvalitního vzduchu pomocí vzduchotechniky.[1, 2]

Jedním z úkolů dobré vzduchotechniky je dodat do místnosti dostatečné množství vzduchu o vysoké kvalitě. Je ale však nutná regulace její intenzity, protože nadměrné větrání způsobuje zvýšenou spotřebu energie. V prostorech, kde se využívá vzduchotechnika k větrání je taková regulace jedním z úsporných opatření.[2]

Dalším problémem v uzavřených prostorech může být teplota a vlhkost. Vysoká relativní vlhkost může způsobovat tvoření plísní a nízká zase zvyšuje riziko přenosu bakterií a virů.[3]

2.2 Kritéria kvality vzduchu

Určování kvality ovzduší ve vnitřních prostorech je většinou velmi komplikované, protože posuzovaný vzduch může obsahovat mnoho kontaminantů, které mají vliv na celkovou kvalitu ovzduší. Především se jedná o tyto látky:

- Oxid uhličitý (CO_2) - Vzniká při spalování a dýchání

- Oxid uhelnatý (CO) - Velmi nebezpečný, vzniká při nedokonalém spalování
- Těkavé organické látky - Hlavním zdrojem je cigaretový kouř nebo různé chemické čisticí prostředky
- Oxid dusíku - Vzniká v malém množství při spalování
- Radon - Jedná se o velmi nebezpečný radioaktivní plyn, který může do budovy pronikat z podloží, z některých stavebních materiálů nebo z vody

Koncentrace těchto látek se dá změřit, avšak toto měření je často velmi komplikované nebo je zapotřebí měření v dobře vybavené laboratoři. Měření CO₂ je v tomto seznamu výjimkou. Dá se jednoduše měřit a také její koncentrace z části indikuje přítomnost ostatních, obtížně zjistitelných látek. Proto se tato práce zabývá pouze měřením této látky.[2, 4]

Nejvíce se na zhoršení kvality ovzduší v obytných a kancelářských prostorách podílejí lidé svou přítomností. Produkují oxid uhličitý, vodní páru a odpařováním potu také pachy. Vzhledem k relativně snadné měřitelnosti, se již více než 150 let používá jako ukazatel kvality ovzduší koncentrace CO₂. Použití CO₂ pro řízení ventilačních systémů je vhodné pouze v případě, že pro vnitřní prostředí není dominantní žádná jiná znečišťující látka. Například, když se člověk sprchuje v koupelně, bude vlhkost dominantnější znečišťující látkou. Přesto je používání CO₂ jako ukazatele kvality vnitřního ovzduší široce používáno.[2, 5, 4]

Podle vyhlášky č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby, nesmí koncentrace ve vnitřním vzduchu budov překročit hodnotu 1500 ppm. Obecně se však udává jako limitní hodnota 1000 ppm, jelikož některým lidem se může zdát vzduch nad touto hodnotou těžký a vydýchaný, či se u nich může objevit pocit ospalosti. Další hraniční hodnoty koncentrace jsou uvedeny v tabulce 2.1 níže. [4, 6]

Tabulka 2.1: Hraniční hodnoty koncentrace oxidu uhličitého.[7]

| | |
|-------------------|---|
| 360-400 ppm | čerstvý vzduch v přírodě |
| 800-1000 ppm | doporučená úroveň CO ₂ ve vnitřních prostorách |
| > 1000 ppm | nastávají příznaky únavy a snižování koncentrace |
| 5000 ppm | maximální bezpečná koncentrace bez zdravotních rizik |
| 35 000-50 000 ppm | vydechovaný vzduch dospělého člověka |

Koncentrace CO₂ se nejčastěji udává v jednotkách ppm (parts per milion), někdy se ale taky udává v mg/m³ nebo v procentech. Pro přepočty mezi jednotlivými jednotkami používáme následující vztah 2.1.[4]

$$1000[ppm] = 1800[mg/m^3] = 0,1[\%] \quad (2.1)$$

Vydechovaný vzduch člověka obsahuje přibližně 4 % CO_2 (zatímco vnější vzduch obsahuje přibližně 0,04 % nebo 400 ppm). Některé zdroje uvádějí, že CO_2 v koncentracích pod 10 000 ppm je ještě neškodný zápachající plyn. Vysoké koncentrace (přibližně několik procent) ve vnitřním prostředí ale mohou ovlivnit frekvenci a hloubku dýchání člověka. Citliví lidé, například lidé s CNSLD (chronickou nespecifikovanou plicní nemocí), mohou mít problémy při mnohem nižších koncentracích. Venkovní vzduch obsahuje asi 400 ppm CO_2 a je ovlivňován hlavně produkty spalování, například z topných systémů, dopravy a průmyslu. Úroveň CO_2 venku se za poslední desetiletí lehce zvýšila. Velmi zhruba řečeno, za poslední desetiletí došlo k nárůstu o 1 ppm ročně. V závislosti na venkovním umístění a místních zdrojích emisí může venkovní úroveň dosáhnout 500 až 800 ppm. Vyšší koncentrace se vyskytují na velmi frekventovaných dopravních přejezdech. V dnešní době se pro výpočty často používá venkovní koncentrace 380 ppm. Je důležité si uvědomit, že použití hladin CO_2 ve vnitřních prostorách jako indikátor znečištění vnitřního ovzduší v důsledku obsazení by se mělo týkat zvýšení CO_2 nad venkovní hladinu, a nikoli absolutní úrovně CO_2 . [1]

Existují zdroje CO_2 jiné než z osob ve vnitřním prostředí, například emise CO_2 z otevřených plynových spotřebičů, kouření cigaret a z domácích zvířat. Produkce CO_2 na osobu závisí na:

- věk, hmotnost a výška
- pohlaví
- těhotenství
- aktivita

Do věku kolem 14 - 15 let není velký rozdíl v produkci CO_2 osobami z pohledu různého pohlaví. Nad tímto věkem se vyskytují rozdíly. Muži jsou obvykle vyšší a budou mít v průměru vyšší hmotnost, takže produkují více CO_2 . Ale nejdůležitějším parametrem pro dospělé je úroveň aktivity. Obecně je produkce CO_2 téměř úměrná úrovni aktivity. [1]

2.3 Senzorika pro měření kvality ovzduší

Vnímání množství CO_2 , teploty nebo vlhkosti ve vzduchu je velmi subjektivní a relativní. Pro přesné měření těchto hodnot používáme senzory na to určené.

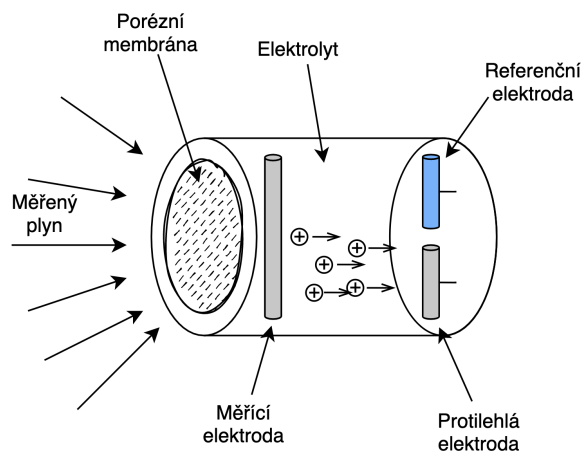
2.3.1 Měření CO_2

Čidla CO_2 fungují na různých principech jako např. na fotoakustickém principu měření koncentrace plynů. Vzduch, který měříme je v uzavřené baňce osvětlován infračerveným světlem o vlnové délce $4,25\mu\text{m}$. Záření rozkmitá molekuly CO_2 , které svými vzájemnými nárazy zvyšují teplotu a tím i tlak v měřicí baňce. Změna tlaku je závislá na koncentraci CO_2 a měří se jako akustický tlak mikrofonom. Tlak v baňce se tak převádí na napěťový signál 0 až 10V, což nám udává hodnotu CO_2 běžně v

rozsahu 0 až 2000 ppm. Avšak v dnešní době už se takovýto typ čidla nepoužívá a byl nahrazen dvěma typy. První z nich je senzor založený na chemické metodě a druhý je založený na metodě NDIR (Non-Dispersive InfraRed). Tyto typy jsou nejčastěji používané pro měření koncentrace CO_2 ve vnitřních prostorech. Využití elektrochemických senzorů bylo v dřívějších dobách hlavně v průmyslu, protože měřili koncentrace od 100 ppm až do hodnot blízkých se 50 000 ppm. Mají však mnoho omezení, která platí pro řadu praktických oblastí. Zjevnou nevýhodou těchto senzorů je krátkodobá stabilita a nízká životnost, obvykle 1 až 2 roky. Důvodem je, že elektrolyt v chemických senzorech postupně degraduje a současně jsou snadno otrávitelné heterogenními plyny a nepatrnými částicemi ve znečištěném prostředí. V dnešní době je nahradili NDIR senzory, které disponují vyšší životností a také dosahují požadovaného rozsahu měřitelnosti. Proto se použití elektrochemických senzorů výrazně omezilo a najdeme je dnes už jen jako univerzální příruční přenosná zařízení, u kterých se dá jednoduše vyměnit měřicí patrona a tím prodloužit životnost senzoru. [2, 8]

Princip funkce elektrochemického senzoru spočívá ve vytváření elektrického signálu, jehož hodnota je úměrná koncentraci CO_2 vlivem reakce elektrolytu uvnitř senzoru a molekul měřeného plynu. Takový senzor se skládá minimálně ze dvou elektrod (měřicí a protielektroda) a elektrolytu. Chemické složení těchto částí je přizpůsobené měřenému plynu, v našem případě CO_2 . Elektrody jsou spojeny dvěma různými způsoby. Na jedné straně jsou spojeny přes elektrický vodivý elektrolyt a na druhé přes externí elektrický obvod. [2, 8]

Nevýhod tohoto základního typu senzoru je mnoho. Například, pokud se vyskytuje v měřeném ovzduší vyšší koncentrace plynů, může to vést k vyšší hodnotě proudu a tím ke snížení napětí, kterým se pak mění předkonfigurované napětí senzoru. Toto následně vede k nepoužitelným výsledkům měřicího signálu nebo v nejhorším případě k chemické reakci v senzoru. Z toho důvodu obsahují kvalitnější senzory navíc třetí, tzv. referenční elektrodu, díky které zůstává elektrický potenciál konstantní. Ta slouží k neustálému měření napětí senzoru na měřicí elektrodě. Tím se výrazně zlepšuje přesnost měření a životnost senzoru.[2, 8]

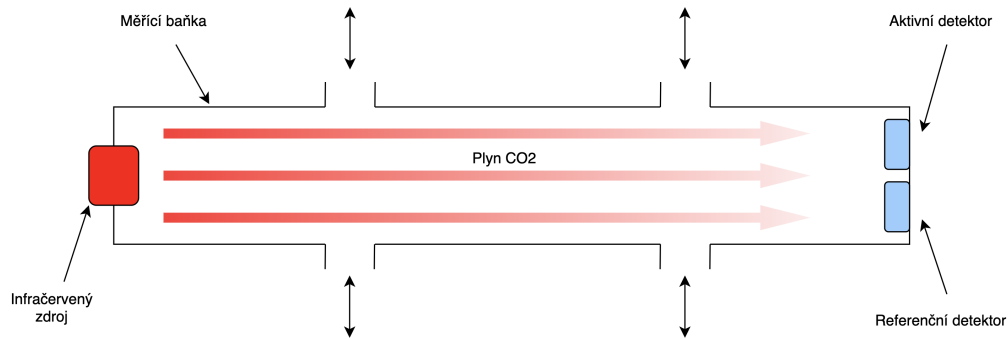


Obrázek 2.1: Schéma CO_2 senzoru založeného na chemické metodě

Na druhou stranu senzory založené na NDIR využívají pokročilejších technologií. Metoda NDIR využívá princip fyzického snímání absorpce infračerveného záření plynem, ta se vyznačuje dlouhodobou stabilitou, přesností a mírou spotřeby energie během měření CO₂. Proto jsou senzory CO₂ na bázi NDIR nejpoužívanější pro aplikace monitorování v reálném čase pro měření koncentrace CO₂. Základním principem NDIR je využití rychlosti absorpce IR záření CO₂. Metoda detekuje změnu propustnosti směsného plynu včetně CO₂ při střední vlnové délce kolem 4,28 μ m. Záření emitované při specifické vlnové délce může být podle Lambertova-Beerova zákona spojeno s prostorově průměrovanou koncentrací CO₂. Známary Lambertův-Beerův zákon popisuje absorpci energie záření molekulami plynu takto:

$$\frac{I_d}{I_o} = e^{-\alpha \cdot c \cdot L} \quad (2.2)$$

kde $I_o(W/cm^2)$ představuje intenzitu zdroje světla (tj. intenzitu záření detekovanou bez přítomnosti CO₂), I_d je naměřená intenzita světla záření detekovaného při dané vlnové délce v pásmu 4,28 μ m. α je absorpční koeficient CO₂, c je průměrná koncentrace CO₂ v ppm a L je délka cesty světla od zdroje k detektoru (tj. délka optické dráhy).[9]



Obrázek 2.2: Schéma CO₂ senzoru založeného na NDIR

2.3.2 Měření teploty

Teplota patří k nejdůležitějším parametrům pro optimální zpracování různých technologických procesů. Je také jedna z nejdůležitějších termodynamických vlastností, udává stav hmoty a objevuje se v mnoha fyzikálních zákonech. Teplota je veličina, která se jako jedna z mála nedá měřit přímo, ale pouze zapotřebí jiných fyzikálních veličin. Jedná se o měření nepřímé. Senzor teploty tvoří funkční prvek, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Každý senzor teploty obsahuje tzv. čidlo teploty, tj. část snímače převádějící teplotu na jinou fyzikální veličinu.[10]

Senzory teploty se dělí podle fyzikálního principu, podle styku s měřeným prostředím a podle transformace signálu. Dle fyzikálního principu dělíme senzory teploty na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické,

a na další jako jsou např. kapacitní, aerodynamické. Dle styku s měřeným prostředím dělíme senzory teploty na dotykové a bezdotykové. Dle transformace signálu dělíme senzory na aktivní, které nepotřebují zdroj elektrické energie, ale působením teploty vytváří tzv. termoelektrickou energii a na pasivní, u kterých je potřebné elektrické napájení pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu.[10]

2.3.3 Měření vlhkosti

Vlhký vzduch je tvořen směsí suchého vzduchu a vodní páry. Relativní vlhkost vzduchu nám určuje, do jaké míry je vzduch nasycen vodní parou. Překročení hranice 100 % relativní vlhkosti má za následek vytvoření mlhy ve vzduchu. Teplota vzduchu značně ovlivňuje nasycení vzduchu vodní parou. Zvýšením teploty vzduchu docílíme snížení relativní vlhkosti, a naopak, v nízkých teplotách dosáhneme snadno 100 % vlhkosti.[11]

Nasycení vodní parou v interiéru je určováno stavem vodních par v exteriéru a zároveň jejich zdroji uvnitř budovy. V létě je obsah vodních par ve vzduchu relativně vysoký, jelikož čím vyšší je teplota vzduchu, tím více je schopen pohltit vodní páry. Takovýto vzduch přivedený do interiéru, je po ochlazení téměř nasycen a jeho relativní vlhkost může dosahovat téměř 100 %. Naopak v zimě je relativní vlhkost vzduchu nízká, protože při nízkých teplotách vlhkost vzduchu kondenzuje nebo dokonce mrzne a padá k zemi. Takovýto vzduch přivedený do interiéru, může být po ohřátí velmi suchý, jeho relativní vlhkost může klesnout i pod 20 %.[11]

Tabulka 2.2: Zdroje vodní páry v bytě.[11]

| | |
|---------------------------------------|-----------------------|
| ČLOVĚK při lehké činnosti | 30 - 60 g/h |
| při středně těžké práci | 120 - 200 g/h |
| při těžké práci | 200 - 300 g/h |
| KOUPELNA s vanou | 700 g/h |
| se sprchou | 2600 g/h |
| KUCHYNĚ při vaření | 600 - 1500 g/h |
| průměrně denně | 100 g/h |
| SUŠENÍ PRÁDLA (pračka na 4,5 kg) | |
| odstředěného | 50 - 200 g/h |
| mokrého kapajícího | 100 - 500 g/h |
| BAZÉNY (volné vodní plochy) | 40 g/m ² h |
| ROSTLINY | |
| pokojevé květiny, např. fialka(Viola) | 5 - 10 g/h |
| rostliny v květináči, např. kapradina | 7 - 15 g/h |
| fikus střední velikosti | 10 - 20 g/h |
| vodní rostliny, např. leknín | 6 - 8 g/h |

Největším zdrojem vodní páry je člověk a jeho činnosti. V interiéru bytu je největším zdrojem vaření a příprava jídel na plynovém sporáku. *Spálením každého m^3 plynu vzniká dalších asi 1,63 kg páry.* Optimální hodnoty relativní vlhkosti vzduchu s nejmenší zátěží pro lidský organismus z pohledu plísní a rizika infekce jsou 40-60 %. [3, 11]

2.4 Klimatizování uzavřených prostor

Pro chlazení uzavřených prostor se využívají klimatizační systémy. Tyto systémy lze třídit do skupin např. podle uspořádání a podle způsobu kompenzace tepelné zátěže na:

Centrální

- vzduchové - např. jednokanálové, vícezónové, vysokotlaké (s indukčními jednotkami, dvoukanálové, s konstantním nebo s proměnným průtokem vzduchu - VAV) nebo nízkotlaké (jednozónové nebo se zónovými dohříváči)
- kombinované vzduch - voda (fan - coil tj. s ventilátorovými konvektory nebo indukční)
- vodní (dvoutrubkové, čtyřtrubkové)
- chladivové (split, multi-split, s proměnným průtokem chladiva - VRV)

Jednotkové - se samostatnými klimatizačními jednotkami [2]

Kapitola 3

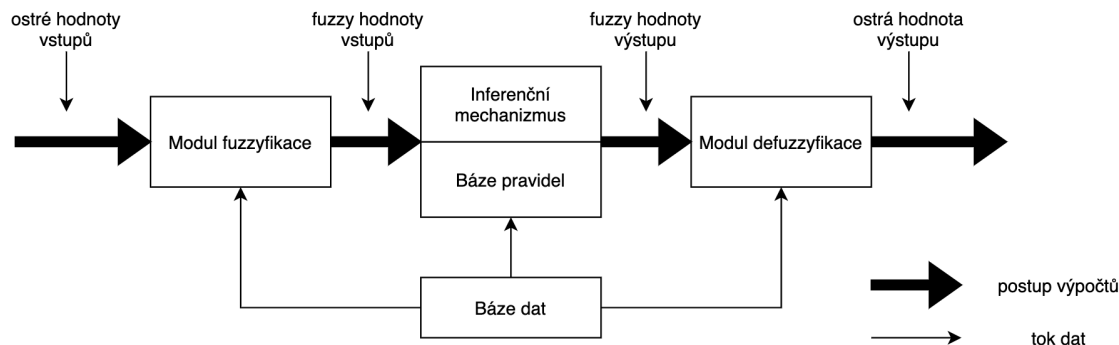
Rozbor problematiky fuzzy rozhodovacího procesu

Fuzzy regulaci, založenou na fuzzy logice používá stále více mikroprocesorových regulátorů. Činnost fuzzy regulátorů spočívá v řízení, které se blíží lidskému myšlení a rozhodování. Nerozhoduje se tedy v exaktních veličinách typu ano/ne nebo 1/0, s nimiž pracují běžné počítače, ale rozlišuje celou škálu veličin jako „ano“, „spíše ano“, „spíše ne“, „ne“ nebo „malá“, „střední“, „velká“. Fuzzy logika (neostrá logika) pracuje s matematickým vyjádřením logiky lidského myšlení, jeho fantazií a tvořivostí. Je proto vhodná k aplikaci v řízení složitých procesů, jako je regulace soustavy klimatizace či vytápění. Jednou z výhod fuzzy regulace je, že vyhodnocuje neostré mezihodnoty vstupních veličin a může pracovat i s meziúdaji a tím např. omezuje kmitání a přeregulování regulované teploty v klimatizované místnosti.[2]

Historie sahá až do druhé poloviny 20. století. Zásady fuzzy logiky vytvořil profesor Lofti A. Zadeh v roce 1965. Anglický pojem fuzzy logika se obtížně překládá do jiných jazyků, v češtině se fuzzy dá přeložit jako „neostrá“ nebo „mlhavá“, tyto slova asi nejlépe vystihují její význam, který má vyjádřit odlišnosti od Booleovy (ostré) logiky, založené na hodnotách ano/ne. [2]

3.1 Princip mechanismu fuzzy systému

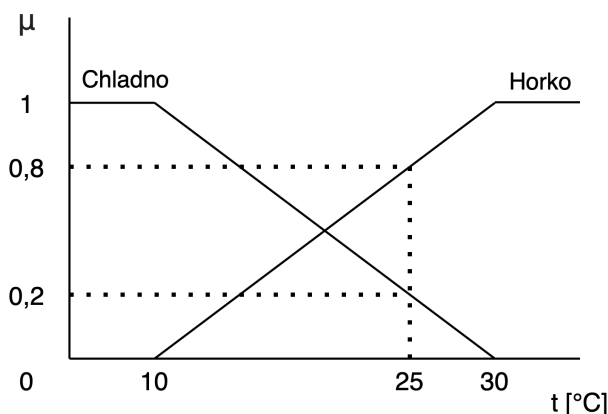
Fuzzy systém se skládá ze tří postupů - fuzzyfikace, defuzzyfikace a inferenčního mechanismu, který postupně vyhodnocuje všechna pravidla a přenáší jejich výsledky do fuzzy množiny.[12]



Obrázek 3.1: Struktura fuzzy systému [12]

3.2 Fuzzyfikace

Úlohou modulu fuzzyfikace je převést ostrou hodnotu na hodnotu fuzzy množiny. Převedením měřené veličiny (např. teplota 25 °C) na základě stupně příslušnosti μ získáme neostrou hodnotu a její přesná hodnota se „zamlží“, „rozostří“. V obr.3.2 je teplota v místnosti hodnotitelná dvěma pojmy „Chladno“ a „Horko“ v rozmezí 10 až 30 °C. Těmto pojmům lze přiřadit jednotlivou míru příslušnosti od 0 do 1 pro každou hodnotu teploty. Vidíme, že teplotě 25 °C přísluší malý stupeň 0,2 pojmu „Chladno“ a velký stupeň 0,8 pojmu „Horko“. To znamená, že funkce příslušnosti vyjadřuje, do jaké míry teplota splňuje daný pojem. Míra příslušnosti k danému pojmu je tím vyšší, čím větší je číslo μ , maximálně však 1. Čím více přísluší k prvním pojmu, tím méně k druhému, ale součet nemusí být roven jedné. [12, 2]



Obrázek 3.2: Přiřazení stupně příslušnosti μ k proměnné teplotě[2]

3.3 Inference

Postupy pro zhodnocení slovních proměnných využívají fuzzy logické operace.

Logická operace OR (NEBO) znamená sjednocení. Tu můžeme vidět v příkladu z obrázku 3.2, kde funkce vyhledá maxima z obou hodnot.

Logická operace AND (A) znamená průnik. Funkce vyhledá minima z hodnot obou funkcí.

Logická operace NEGACE znamená doplněk do jednotky hodnoty jedné z funkcí příslušnosti.[12, 2]

Fuzzy úlohy se hodnotí na základě soustavy obecných pravidel ve tvaru:

Tabulka 3.1: Obecná soustava pravidel[2]

[KDYŽ (IF) podmínka 1, (A (AND) podmínka 2), (A podmínka 3), (...), PAK
(THEN) výsledek 1] NEBO
[KDYŽ, A....., PAK výsledek 2] NEBO
[KDYŽ....., PAK výsledek 3] NEBO

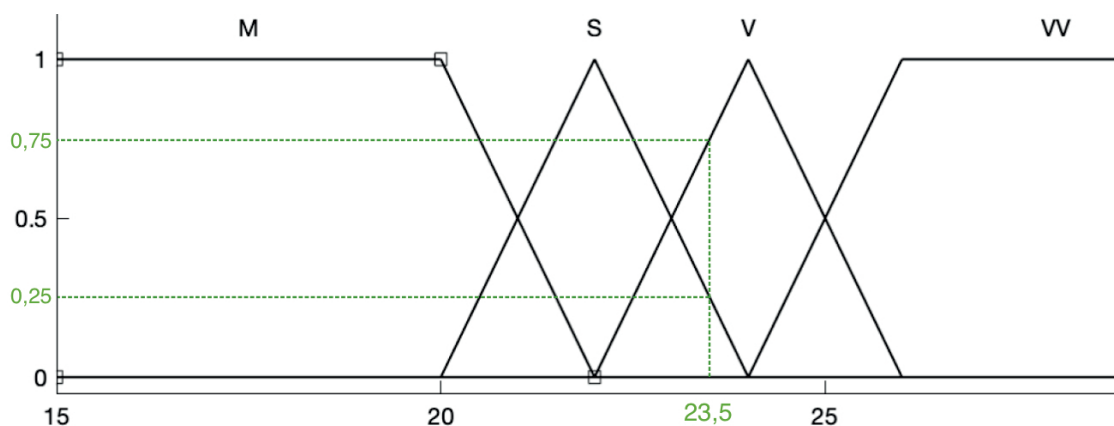
Můžeme vytvářet hodně podobných pravidel, avšak jejich konečný počet závisí na počtu slovních proměnných veličin. Některá pravidla lze vynechat a některá i slučovat. Vždy jen jedno pravidlo je v dané situaci správné a to se použije.[2]

3.4 Defuzzyfikace

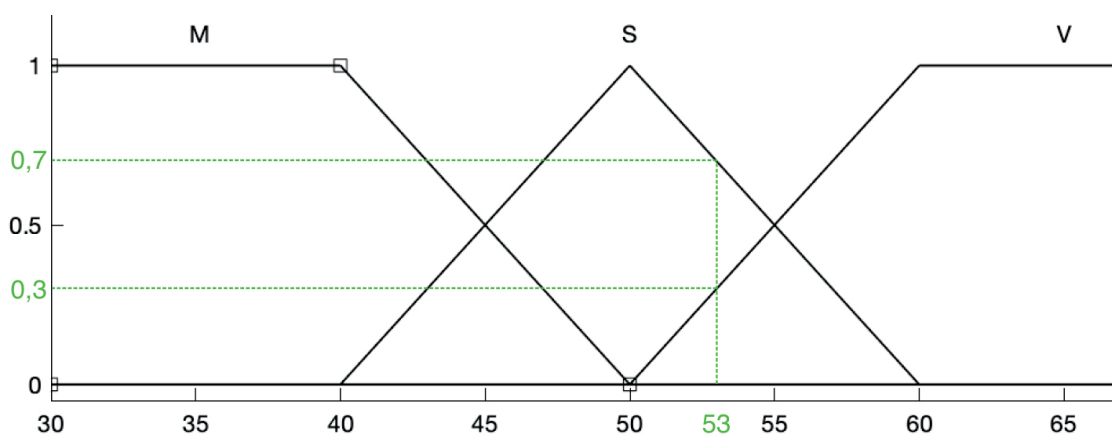
Úlohou modulu defuzzyfikace je naopak převést hodnotu z dané fuzzy množiny na ostrou hodnotu, která je očekávána pohonem regulačního zařízení. Tímto krokem se k výsledku, kterého jsme dosáhli výše uvedeným postupem, přiřadí přesná ostrá hodnota. *Nejčastěji se používá metoda těžiště (jinou metodou je stanovení střední hodnoty maxim).*[12, 2]

3.5 Příklad rozhodování fuzzy systému

Uvedeme si základní příklad rozhodování fuzzy systému, který bude obsahovat dva obecné parametry. Zvolíme si výchozí rozsah regulovaných veličin, v našem případě 15 až 30 jednotek parametru 1 a 30 až 70 jednotek parametru 2. Pro momentální hodnoty parametru 1 a parametru 2 si zvolíme 23,5 a 53. Pro parametr 1 jsou dány čtyři slovní proměnné a pro parametr 2 jsou dány tři. Provedeme fuzzyfikaci a míry příslušnosti k daným slovním proměnným uvedeme do tabulky 3.2.



Obrázek 3.3: Míry příslušnosti pro parametr 1.



Obrázek 3.4: Míry příslušnosti pro parametr 2.

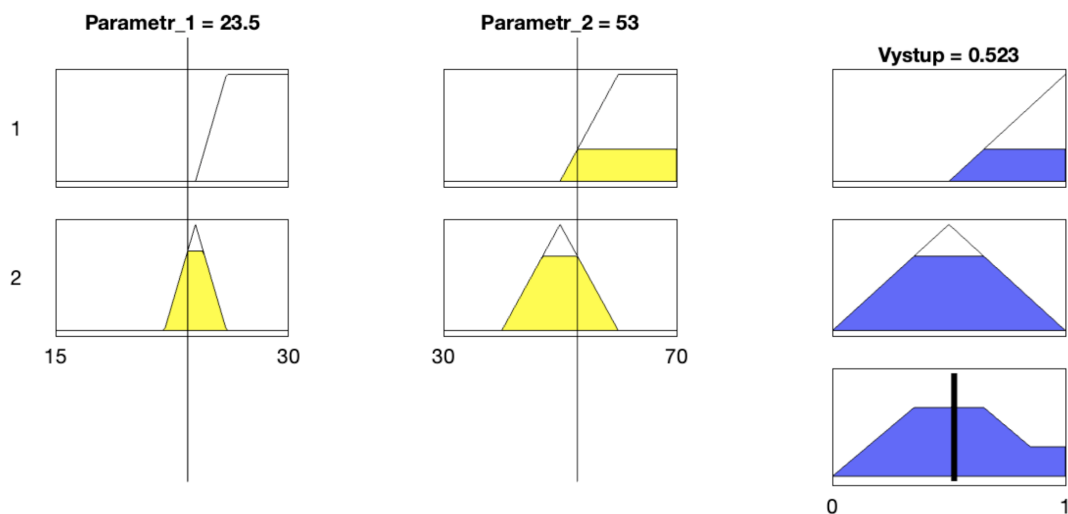
Tabulka 3.2: Míry příslušnosti k slovním proměnným

| Parametr 1 | μ | Parametr 2 | μ |
|-------------------|-------|-------------|-------|
| M - Malý | 0 | M - Malý | 0 |
| S - Střední | 0,25 | S - Střední | 0,7 |
| V - Vysoký | 0,75 | V - Vysoký | 0,3 |
| VV - Velmi vysoký | 0 | | |

V inferenční části si zvolíme soustavu pravidel, která vyplývá z principu úlohy. Pro výstup jsou vytvořeny tři funkce příslušnosti - „Málo“, „Středně“, „Hodně“. V našem případě zvolíme např. tyto pravidla:

1. KDYŽ je parametr 1 velmi vysoký, NEBO parametr 2 vysoký, PAK je výstup hodně.
2. KDYŽ je parametr 1 vysoký, A parametr 2 střední, PAK je výstup středně

Vyhodnocení daného stavu je následovné:



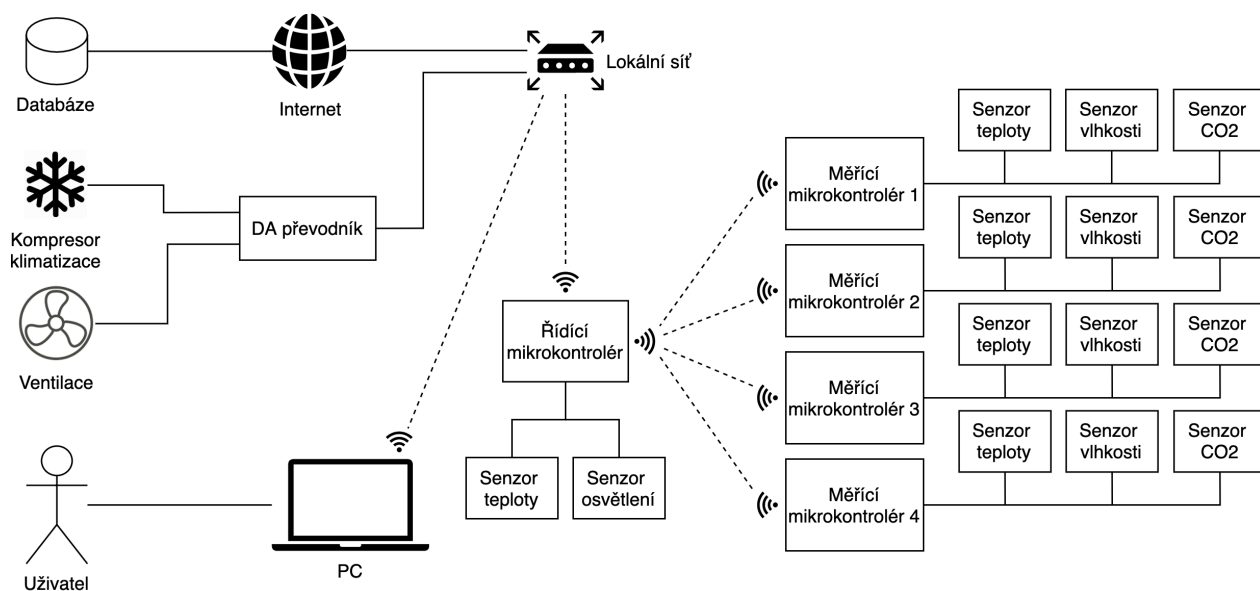
Obrázek 3.5: Vyhodnocení výstupu pomocí metody těžiště

Hodnoty výstupu jsou vyhodnoceny algoritmem max-min, takže míra příslušnosti pro „Hodně“ je 0,3 a pro „Středně“ je 0,7. Výsledný výstup jsme dostali defuzzyfikací metodou těžiště. Hodnota výstupu je v tomto případě $Y=0,523$.

Kapitola 4

Návrh systému pro automatické řízení ventilace a klimatizace s ukládáním historie stavů a naměřených hodnot

Systém pro automatizované řízení ventilace a klimatizace je sestaven z 5 mikrokontrolérů, které jsou rozděleny na jeden řídicí a čtyři měřící (vedlejší) moduly. Řídicí modul zajišťuje sbírání naměřených dat od ostatních připojených měřících modulů a následné řízení výstupů ventilace a klimatizace. Mimo jiné pohání webový server, na který se může uživatel připojit ze svého internetového prohlížeče a zobrazit si všechna naměřená data a také zajišťuje ukládání naměřených dat do databáze pro pozdější uživatelskou analýzu.



Obrázek 4.1: Návrh systému a propojení hardwaru

Měřicí moduly jsou jednotlivě rozmístěny do čtyřech místností, kde zajišťují měření stavu ovzduší a na vyžádání přenáší data do řídicího modulu. Každý měřicí modul obsahuje snímač teploty, vlhkosti a CO₂. Komunikace mezi řídicím a měřicími moduly probíhá bezdrátově.

4.1 Použité komponenty navrhovaného systému

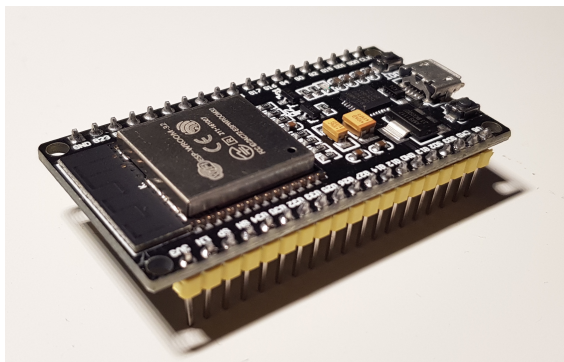
4.1.1 Mikrokontrolér

Pro tuto práci byla zvolena vývojová deska osazena mikrokontrolérem ESP32. ESP32 je nízkonákladový jednočipový počítač od společnosti Espressif Systems, který disponuje integrovanou Wi-Fi (pásmo 2,4GHz) a Bluetooth 4.2. Umožňuje snadné vytváření Internet-of-Things (IoT) aplikací a na trhu je k dispozici široké spektrum modulů a vývojových desek s tímto čipem. ESP32 disponuje Bluetooth Low Energy (BLE), který pokrývá profily založené na L2CAP, GAP, GATT, SMP a GATT, ale také podporuje mnoho klasických Bluetooth protokolů pro starší připojení. Wi-Fi a BLE jsou běžné síťové prvky v aplikacích IoT. ESP32 lze sehnat ve dvou formách: ve formě čipu a ve formě modulu. Tyto formy se pak vyskytují ještě v mnoha provedeních, které mají různé velikosti a různý počet pinů. Na vývojových deskách bývá osazen ESP32 jak ve formě čipu, tak i ve formě modulu.[13]

Tabulka 4.1: Specifikace zakoupené vývojové desky

| | |
|--------------|--|
| Procesor | Dvoujádrový Tensilica LX6 taktovaný na 240 MHz |
| Architektura | 32-bit |
| SRAM | 520 KB |
| Wi-Fi | 2,4 GHz s rychlostí až 150 Mbit/s |
| Bluetooth | BLE a starší |
| Flash paměť | 4 MB |
| Počet pinů | 38 pinů |

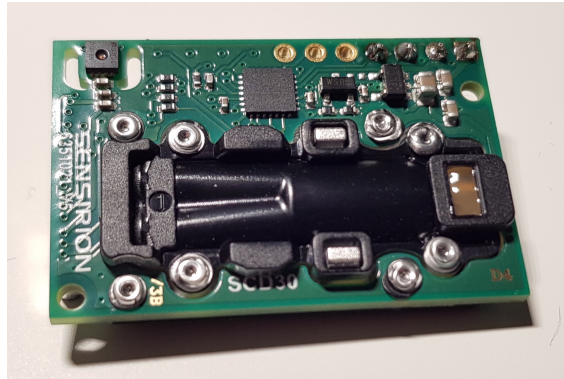
Tato vývojová deska obsahuje rozhraní USB z kterého lze modul napájet i programovat. Komunikaci zajišťuje řadič CP2102. Obsahuje také spoustu periférií, jako: integrovaný Hallův senzor, kapacitní dotykové senzory, ADC a DAC převodníky, UART, SPI, I2C, I2S a mnoho dalšího.



Obrázek 4.2: Vývojová deska s modulem ESP32

4.1.2 Senzor pro měření veličin v místnosti

Senzorový modul SCD30 firmy Sensirion je kalibrovaný NDIR modul pro měření CO₂, teploty a vlhkosti. Je to ideální senzor pro aplikace v systému topení, klimatizace a vzduchotechniky (HVAC) v interiérech budov.



Obrázek 4.3: Senzorový modul Sensirion SCD30

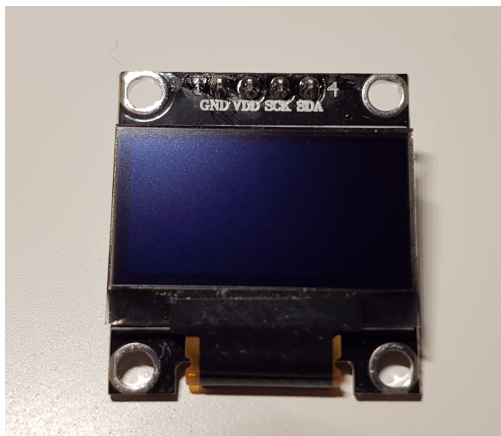
Modul disponuje technologií CMOSens® firmy Sensirion. Jde o malý křemíkový CMOS čip umístěný na desce modulu společně s jednotlivými senzory, který zajišťuje analogové a digitální zpracování signálu. Výsledné sensorové čipy disponují přesným a spolehlivým snímáním požadovaných fyzikálních veličin za konkurenceschopnou cenu. Spolu s technologií měření NDIR pro detekci CO₂ je na stejném modulu senzoru integrován také nejlepší senzor vlhkosti a teploty Sensirion v dané třídě. Okolní vlhkost a teplotu odvozuje modul s pomocí Sensirion algoritmu prostřednictvím modelování a kompenzace externích zdrojů tepla bez potřeby dalších komponent. Díky dvoukanálovému principu pro měření koncentrace oxidu uhličitého senzor automaticky kompenzuje dlouhodobé odchylky.[14]

Tabulka 4.2: Parametry sensorového modulu Sensirion SCD30

| | |
|---------------------------------|--|
| Komunikace | I2C, UART |
| Rozsah měření CO ₂ | 0 - 40 000 ppm |
| Přesnost měření CO ₂ | $\pm(30 \text{ ppm} + 3 \%)$ při rozsahu 400 - 10 000 ppm |
| Teplotní stabilita | $\pm 2.5 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ při teplotě 0 - 50 °C |
| Rozsah měření vlhkosti | 0 - 100 % |
| Přesnost měření vlhkosti | $\pm 3 \%$ při 25 °C |
| Rozsah měření teploty | -40 - 70°C |
| Přesnost měření teploty | $\pm(0.4^\circ\text{C} + 0.023 \times (T[^\circ\text{C}] - 25^\circ\text{C}))$ |

4.1.3 OLED Displej

Použitý displej je jednobarevný OLED displej s rozlišením 128 x 64 pixelů, který využívá sběrnici I2C pro komunikaci. Jeho úhlopříčka 0,96 palce vystačuje na zobrazení všech aktuálních naměřených hodnot. Napájecí napětí displeje je 3,3 - 5V a maximální proud, jaký může displej odebírat je 20mA.[15]



Obrázek 4.4: OLED Displej

4.1.4 HTU21D

HTU21D je přesný, kalibrovaný, digitální senzor vlhkosti a teploty. Senzor má využití v automobilovém průmyslu, domácích aplikacích, zdravotnictví a dalších. Parametry a přesnosti jsou uvedeny v tabulce níže.[16]

Tabulka 4.3: Parametry senzoru HTU21D

| | |
|--------------------------|-----------------|
| Komunikace | I2C |
| Rozsah měření vlhkosti | 0 - 100 % |
| Rozsah měření teploty | -40 – 125°C % |
| Přesnost měření vlhkosti | ±2 % při 25 °C |
| Přesnost měření teploty | ±0.3°C při 25°C |



Obrázek 4.5: Senzor HTU21D

4.1.5 BH1750

BH1750 je modul čidla okolního osvětlení s komunikací přes sběrnici I2C. Parametry a přesnosti jsou uvedeny v tabulce níže.

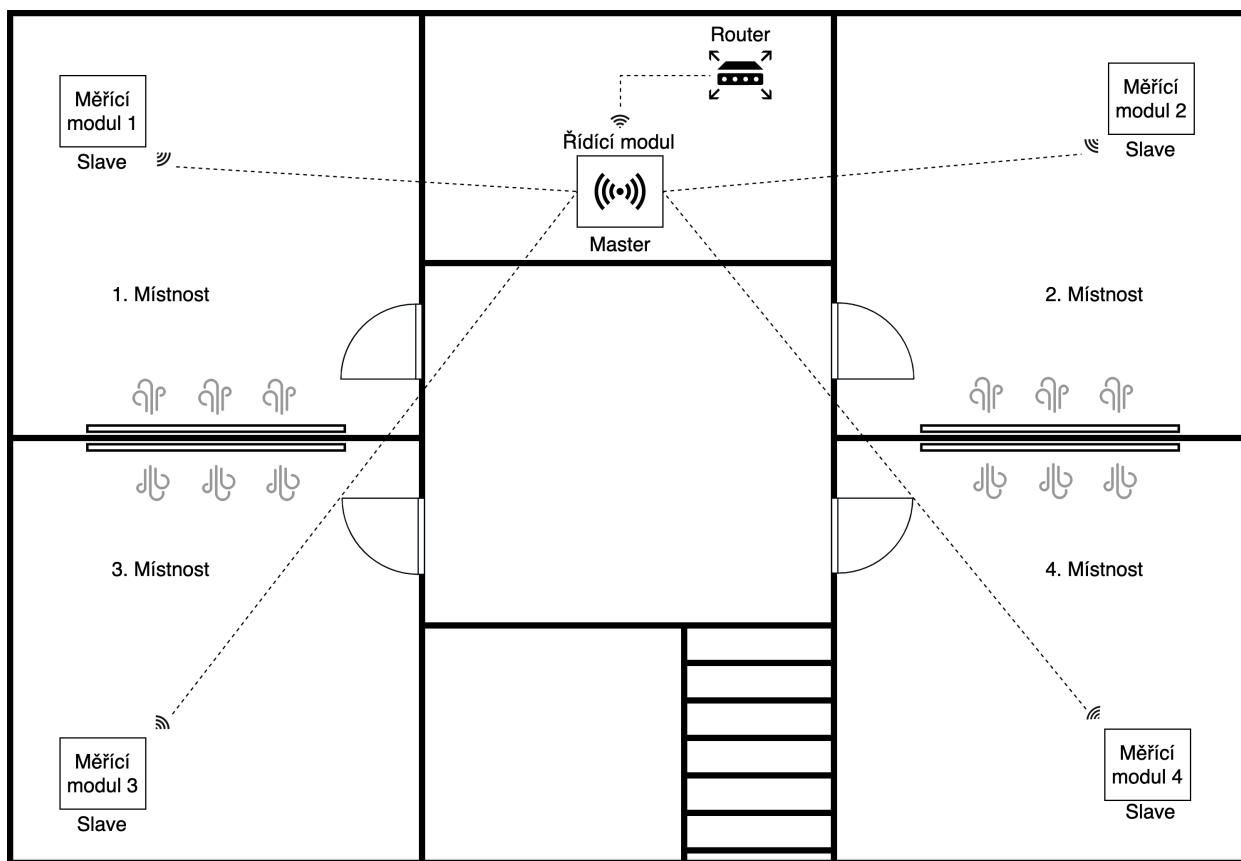
Tabulka 4.4: Parametry senzoru BH1750[17]

| | |
|---------------------------|----------------------|
| Komunikace | I2C |
| Rozsah měření osvětlení | 1 - 65535 lx |
| Přesnost měření osvětlení | $\pm 20 \%$ při 25°C |



Obrázek 4.6: Senzor BH1750

4.2 Návrh rozmístění modulů v budově

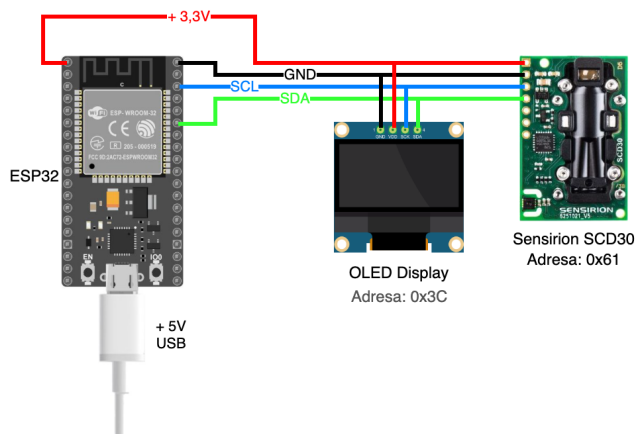


Obrázek 4.7: Návrh umístění modulů v budově

Na modelu kancelářské budovy je proveden návrh umístění jednotlivých modulů 4.7. Model kancelářské budovy obsahuje čtyři hlavní místnosti, jednu chodbu a jednu technickou místnost. Měřicí moduly jsou umístěny samostatně do hlavních místností a hlavní modul do technické místnosti společně s routerem. Budova je opatřena centrální rekuperační jednotkou a centrální klimatizační jednotkou. Každá z hlavních místností má svůj nezávislý výdech ventilace a klimatizace ovládaný klapkami.

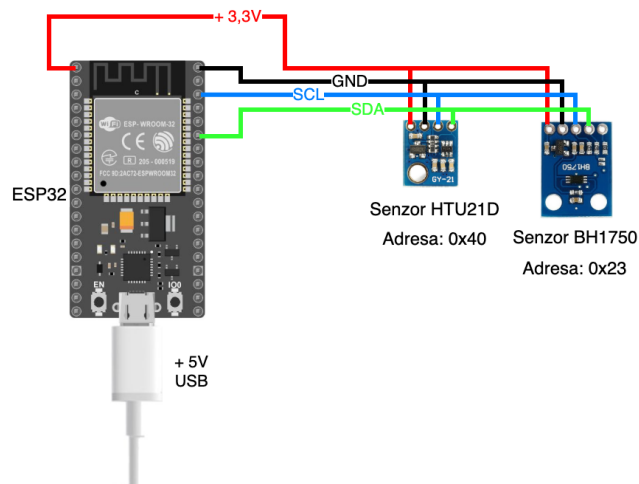
4.3 Návrh zapojení jednotlivých modulů

Systém využívá sběrnici I2C pro čtení dat ze senzorů. I2C je zkratka, která vznikla z IIC bus, tedy Internal-Integrated-Circuit Bus a jedná se o dvou vodičovou interní sériovou sběrnici pro komunikaci mezi různými integrovanými obvody nebo moduly. Jedna linka označená SDA slouží pro přenos sériových dat a druhá, označená SCL představuje hodinový signál přenosu.[18, 19]



Obrázek 4.8: Zapojení měřicího modulu (Slave)

Zařízení připojené k této sběrnici se dělí do dvou kategorií: master a slave. Každá z nich má přiřazenou jednu z těchto funkcí: přijímač nebo vysílač. Master je zařízení, které řídí tok zpráv. Slave je zařízení řízené masterem. Funkce zařízení se může měnit. Některé obvody fungují pouze jako přijímače nebo vysílače a tedy jejich směr toku je neměnný. Jiné mohou tok dat měnit a tedy někdy fungovat jako přijímač a jindy jako vysílač.[18, 19]



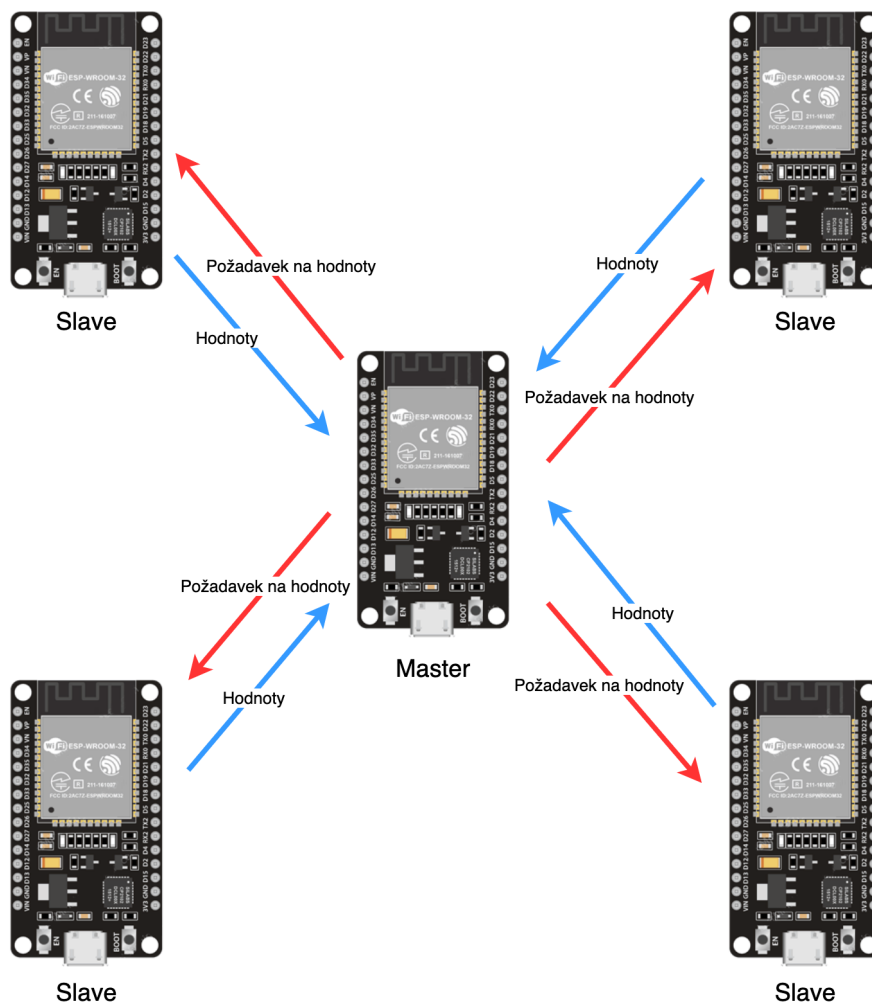
Obrázek 4.9: Zapojení řídicího modulu (Master)

Přenos dat probíhá po bajtech a jednotlivé bity se přenášejí v rámci hodinových cyklů linky SCL. Při každém pulzu SCL je přenesen jeden bit. Signál na lince SDA musí zůstat neměnný po celou dobu trvání impulzu hodin SCL. Start přenosu je oznámen sestupnou hranou SDA při kladném SCL a konec přenosu je oznámen náběžnou hranou SDA při kladném SCL.

Sběrnice I2C není vybavena adresovou sběrnici a z toho důvodu musí být adresa vysílána stejným způsobem jako data. Adresy I2C zařízení se skládají z pevné části, která je zabudovaná v obvodu, a z volitelné části, aby bylo možné připojit na sběrnici více stejných obvodů.[18, 19]

4.4 Návrh komunikace mezi mikrokontroléry

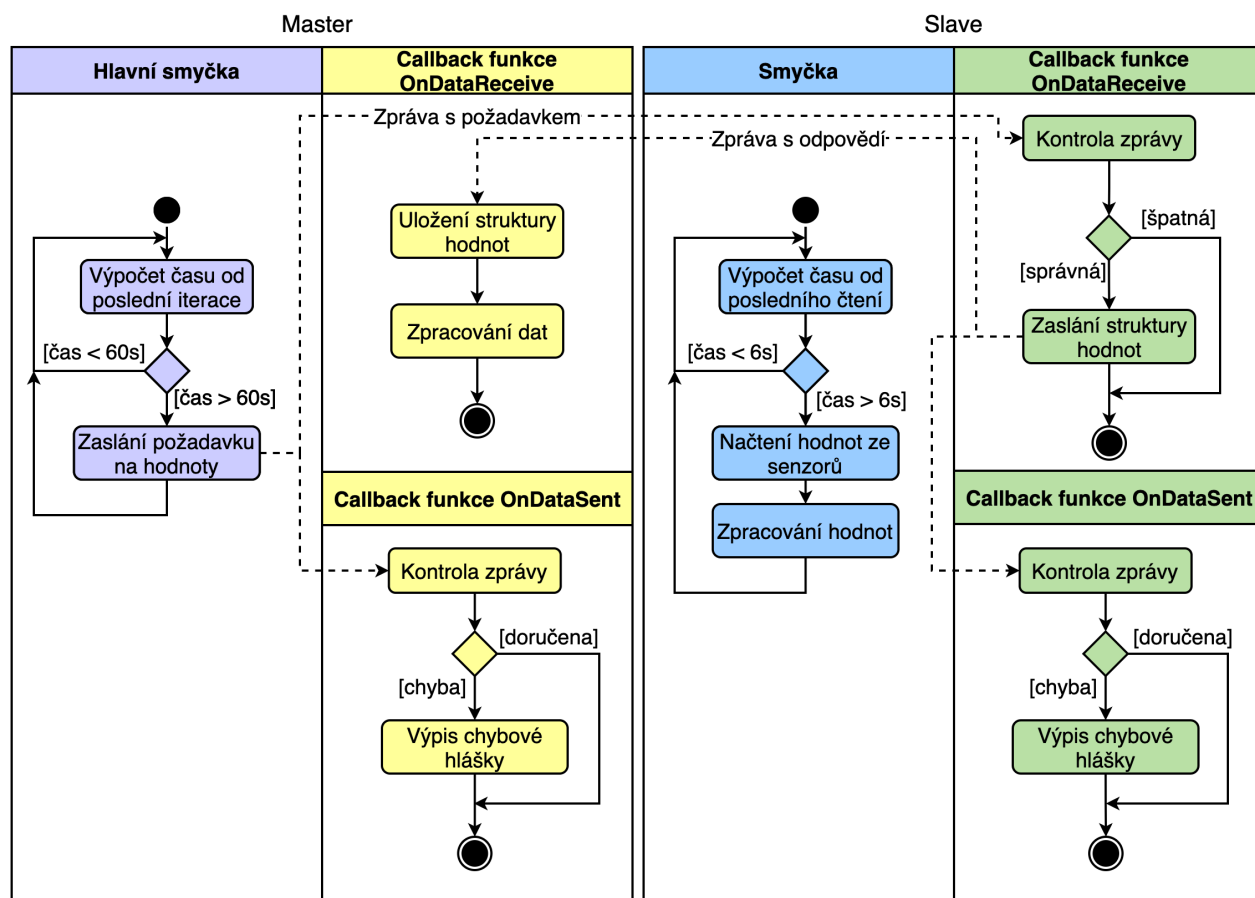
Komunikace mezi jednotlivými ESP32 je provedena přes bezdrátový protokol ESP-NOW. ESP-NOW je protokol vyvinutý společností Espressif, který umožňuje vzájemnou komunikaci více zařízení bez použití Wi-Fi. Protokol je podobný bezdrátovému připojení, který se často používá v bezdrátových myších. Má nízkou spotřebu energie a pracuje na frekvenci 2,4 GHz. Párování mezi zařízeními je nutné provést před zahájením jejich komunikace. Po dokončení párování je připojení zabezpečené a peer-to-peer. To znamená, že po spárování zařízení je připojení mezi nimi trvalé. Pokud najednou některá z desek ztratí energii nebo se resetuje, po restartu se automaticky připojí ke svému kolegovi a bude pokračovat v komunikaci. ESP-NOW je rychlý komunikační protokol, který může být využit pro přenos malých zpráv (do 250 bajtů) mezi deskami ESP32. [20, 21]



Obrázek 4.10: Schéma komunikace ESP-NOW

Program pro komunikaci je navržen pro chod v pravidelných cyklech, kde v **hlavní smyčce** vyše master každých 60 sekund požadavek o naměřené hodnoty spárovaným modulům slave. Slave

modul měří ve **smýčce** nezávisle každých 6 sekund veličiny v místnosti, ukládá tyto hodnoty do pole struktur a z deseti naměřených hodnot vypočítá medián, který slouží k eliminaci případných nežádoucích výchylek v měření. Slave moduly zároveň vyčkávají na požadavek od mastera. Jakmile master vyšle požadavek všem spárovaným zařízením, každý slave tento požadavek zpracuje a pokud se jedná o požadavek o naměřené hodnoty veličin, tak vypočítaný medián zašle spárovanému masteru. ESP-NOW disponuje callback funkcemi, které se registrují při startu systému. Tyto funkce jsou následně volány při zasílání nebo přijímání dat a slouží ke zpracování těchto dat. Díky těmto funkcím může aplikační vrstva rozpoznat, zda-li bylo doručení zprávy protější straně doručeno úspěšně či nikoliv. Pokud by se přenos požadavku ze strany mastera nezdařil, vyhodí systém chybu a pokusí se o zaslání v další iteraci programu.

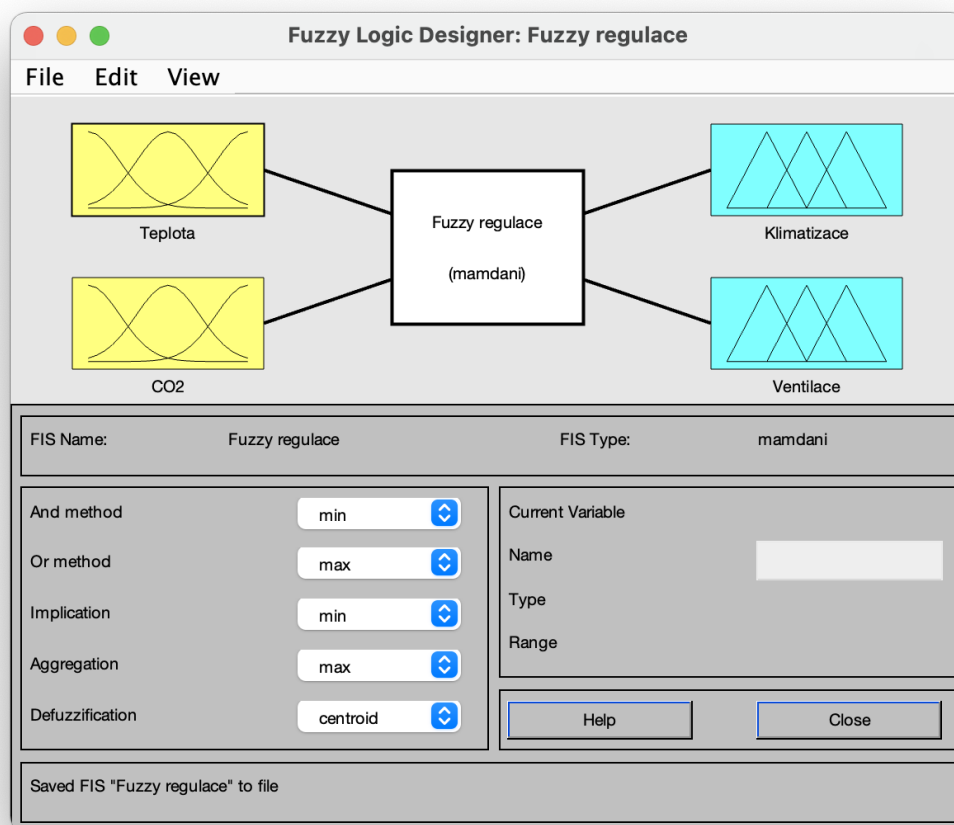


Obrázek 4.11: UML diagram znázorňující princip komunikace, čtení ze senzorů a ukládání naměřených dat

4.5 Návrh fuzzy systému pro regulaci

Pro návrh fuzzy systému byl využit software Matlab. Tento software má v sobě integrovaný Fuzzy Logic Toolbox, který poskytuje funkce pro analýzu, návrh a simulaci systémů založených na fuzzy logice. Obsahuje 5 základních nástrojů pro vytvoření, editaci a ladění fuzzy inferenčního systému. FIS editor, MF editor, Rule editor, Rule Viewer a Surface Viewer.

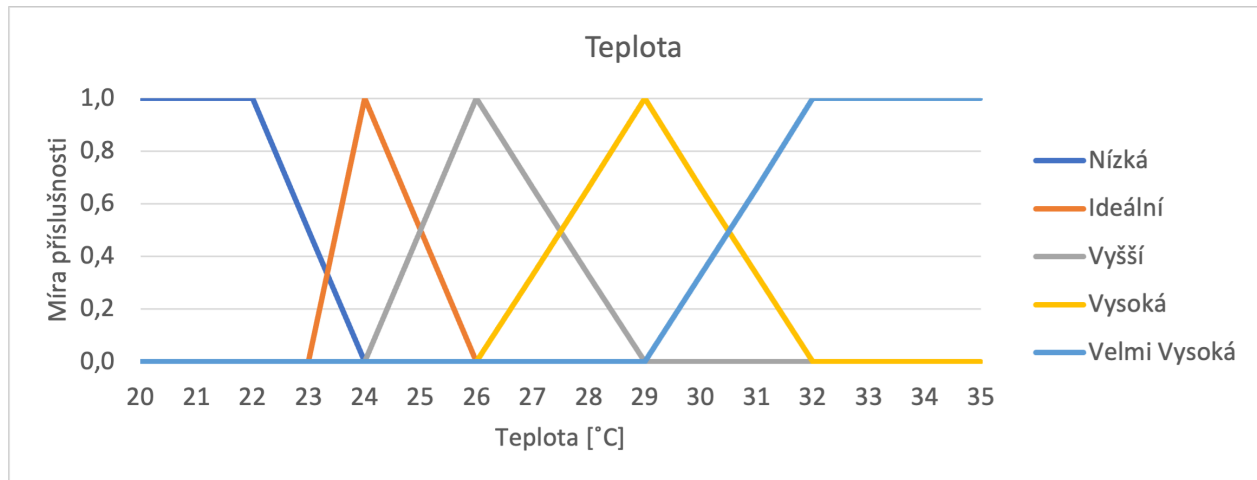
FIS editor (Fuzzy Interface System editor) umožňuje definovat základní parametry fuzzy systému jako počet vstupních a výstupních proměnných a jejich jména. MF editor (Membership Function editor) umožňuje definovat tvary všech funkcí příslušnosti pro všechny vstupní a výstupní proměnné. Rule editor umožňuje vytvářet a editovat fuzzy pravidla, která popisují chování fuzzy systému. Rule viewer a Surface viewer jsou nástroje sloužící pouze k prohlížení chování navrženého fuzzy systému. Rule viewer slouží k zobrazení fuzzy inference jednotlivých pravidel a lze pomocí něj sledovat chování jednotlivých pravidel. Surface viewer slouží k zobrazení řídicí plochy navrhovaného systému.[12]



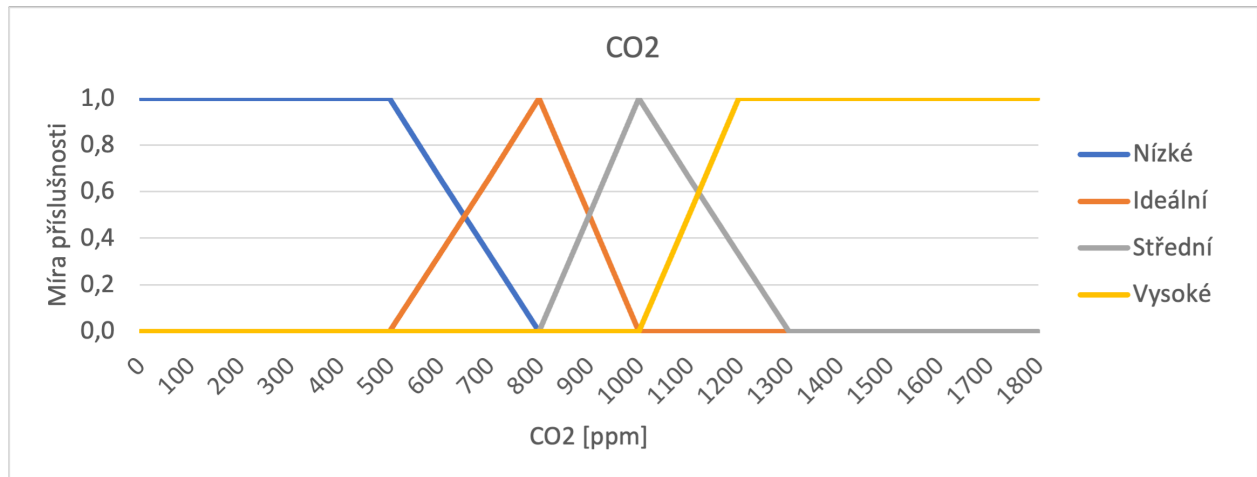
Obrázek 4.12: Navržený fuzzy systém v softwaru Matlab

4.5.1 Fuzzyfikace

Pro zajištění plynulé regulace je vstupní teplota rozdělena do 5 funkcí příslušnosti: Nízká, Ideální, Vyšší, Vysoká, Velmi Vysoká. Vstupní CO₂ je rozděleno do 4 funkcí příslušnosti: Nízké, Ideální, Střední, Vysoké. Nastavení parametrů jednotlivých funkcí je uvedeno v grafech níže. Základem jsou lichoběžníkové a trojúhelníkové funkce z důvodu výpočetní jednoduchosti.

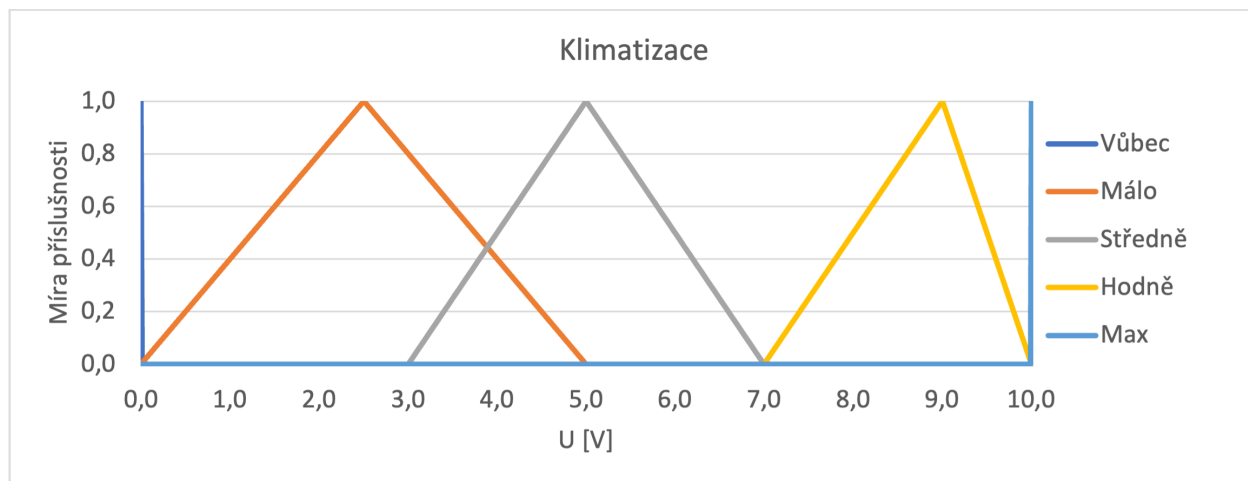


Obrázek 4.13: Fuzzyfikace vstupu teploty

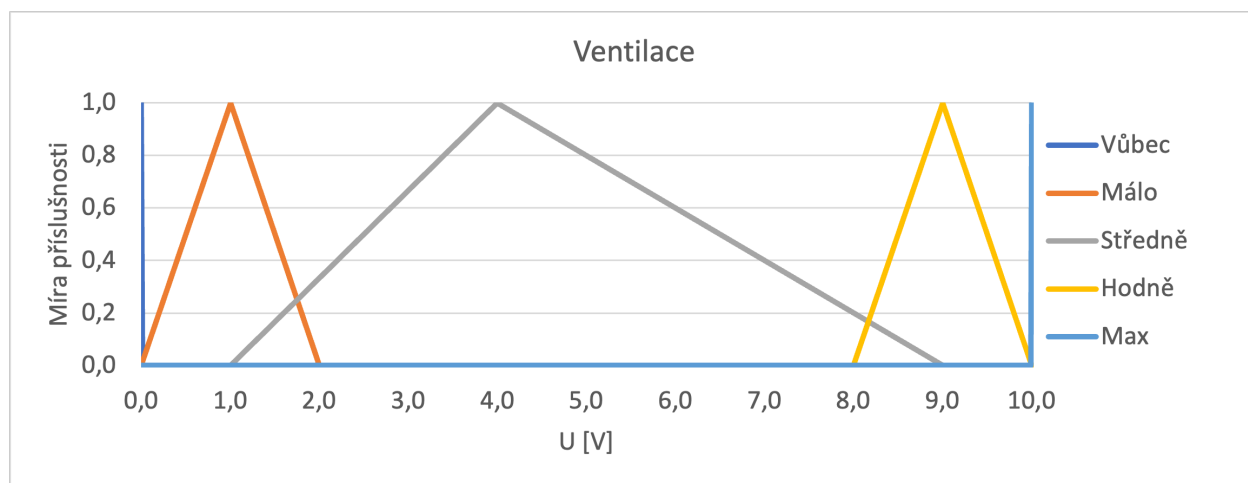


Obrázek 4.14: Fuzzyfikace vstupu CO₂

Výstup klimatizace a ventilace, který nabývá hodnot 0 - 10V, je rozdělen do 5 funkcí příslušnosti, z nichž 3 jsou trojúhelníkového typu a 2 typu zvaný singleton. Singleton se zde využívá pro zajištění maximální a minimální hodnoty na výstupu daného zařízení.



Obrázek 4.15: Fuzzyfikace výstupu klimatizace



Obrázek 4.16: Fuzzyfikace výstupu ventilace

4.5.2 Seznam pravidel pro návrh fuzzy systému

Fuzzy inferenční pravidla byla volena tak, aby byla zajištěna co nejplynulejší a nejlogičtější výsledná regulace. V seznamu níže, jsou pravidla tvořena tak, aby pokryli všechny možné kombinace funkcí příslušnosti a nevzniklo tak žádné prázdné místo.

Tabulka 4.5: Vytvořené pravidla

| # | Pravidlo |
|----|---|
| 01 | If (Teplota is Nizka) and (CO2 is Nizke) then (Klima is Vubec) (Ventilace is Vubec) |
| 02 | If (Teplota is Nizka) and (CO2 is Ideálni) then (Klima is Vubec) (Ventilace is Malo) |
| 03 | If (Teplota is Nizka) and (CO2 is Stredni) then (Klima is Vubec) (Ventilace is Stredne) |
| 04 | If (Teplota is Nizka) and (CO2 is Vysoke) then (Klima is Vubec) (Ventilace is Hodne) |
| 05 | If (Teplota is Ideálni) and (CO2 is Nizke) then (Klima is Malo) (Ventilace is Malo) |
| 06 | If (Teplota is Ideálni) and (CO2 is Ideálni) then (Klima is Malo) (Ventilace is Malo) |
| 07 | If (Teplota is Ideálni) and (CO2 is Stredni) then (Klima is Malo) (Ventilace is Stredne) |
| 08 | If (Teplota is Ideálni) and (CO2 is Vysoke) then (Klima is Malo) (Ventilace is Hodne) |
| 09 | If (Teplota is Vyssi) and (CO2 is Nizke) then (Klima is Stredne) (Ventilace is Stredne) |
| 10 | If (Teplota is Vyssi) and (CO2 is Ideálni) then (Klima is Stredne) (Ventilace is Stredne) |
| 11 | If (Teplota is Vyssi) and (CO2 is Stredni) then (Klima is Stredne) (Ventilace is Stredne) |
| 12 | If (Teplota is Vyssi) and (CO2 is Vysoke) then (Klima is Stredne) (Ventilace is Hodne) |
| 13 | If (Teplota is Vysoka) and (CO2 is Nizke) then (Klima is Hodne) (Ventilace is Stredne) |
| 14 | If (Teplota is Vysoka) and (CO2 is Ideálni) then (Klima is Hodne) (Ventilace is Hodne) |
| 15 | If (Teplota is Vysoka) and (CO2 is Stredni) then (Klima is Hodne) (Ventilace is Hodne) |
| 16 | If (Teplota is Vysoka) and (CO2 is Vysoke) then (Klima is Hodne) (Ventilace is Hodne) |
| 17 | If (Teplota is VelmiVysoka) and (CO2 is Nizke) then (Klima is Max) (Ventilace is Hodne) |
| 18 | If (Teplota is VelmiVysoka) and (CO2 is Ideálni) then (Klima is Max) (Ventilace is Hodne) |
| 19 | If (Teplota is VelmiVysoka) and (CO2 is Stredni) then (Klima is Max) (Ventilace is Max) |
| 20 | If (Teplota is VelmiVysoka) and (CO2 is Vysoke) then (Klima is Max) (Ventilace is Max) |

Kapitola 5

Realizace systému pro automatické řízení ventilace a klimatizace s využitím mikrokontroléru ESP a senzorky Sensirion

Pro realizaci a naprogramování systému pro automatické řízení ventilace a klimatizace byla využita platforma Arduino. Pro naprogramování bylo použito vývojové prostředí Arduino IDE a také prostředí Microsoft Visual Studio Code s doplňkem PlatformIO.

5.1 Popis softwarové implementace mikrokontrolérů ESP32

Arduino IDE je jednoduché vývojové prostředí, které se používá k vývoji a nahrávání programů na desky kompatibilní s platformou Arduino. Využívá programovací jazyk Wiring, který vychází z jazyka C++. Arduino IDE se obecně využívá pro programování jednoduchých malých aplikací, které nezahrnují velké množství kódu či více souborů v projektu. V této práci je využito pro naprogramování mikrokontrolérů ESP32, avšak pouze zařízení typu „Slave“, jelikož tyto zařízení pouze sbírají naměřená data a neobsahují tak velké množství kódu. Na druhou stranu zařízení typu „Master“ obsahuje již velké množství zdrojového kódu a souborů a proto bylo zapotřebí využít sofistikovanější vývojové prostředí.

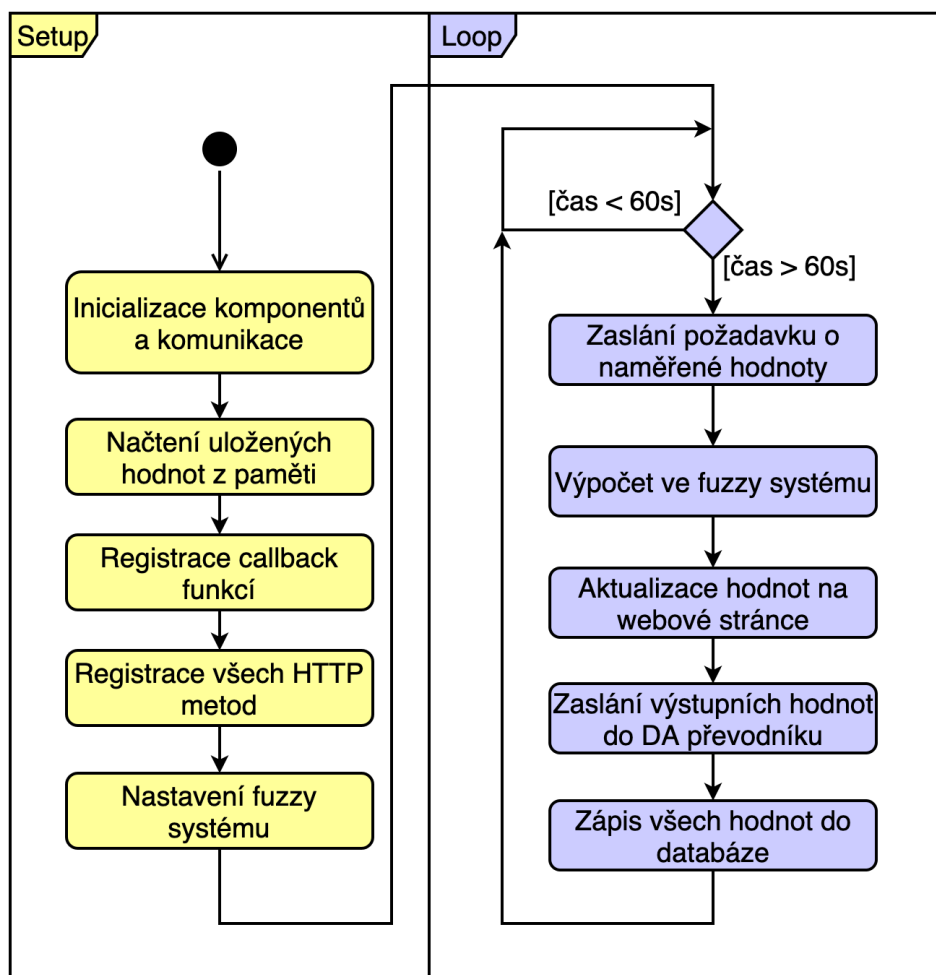
Visual Studio Code je lehký, ale výkonný editor zdrojového kódu vyvíjený společností Microsoft, který je k dispozici pro Windows, macOS a Linux. Nabízí funkce jako formátování kódu, inteligentní našeptávání, navigaci v kódu, refactoring kódu a mnoho dalšího. Dodává se s integrovanou podporou pro JavaScript, TypeScript a Node.js a má bohatý ekosystém rozšíření pro další jazyky (jako je C++, C#, Java, Python, PHP, Go) a runtime (jako .NET a Unity). PlatformIO je multiplatformní framework, nástroj pro vývoj vestavěných systémů. Tento nástroj, instalovaný jako doplněk ve Visual Code, nám společně s Visual Code umožňuje programování mikrokontrolérů ESP32. Přidává do Visual Code nástroje jako sériový monitor, manažer knihoven a také nástroje pro kompilaci a

nahrávání kódu do mikrokontroléru. Manažer knihoven je napojen na PlatformIO registr knihoven a na VCS repozitáře (Git, Hg, SVN), takže umožňuje vyhledávání a jednoduchou instalaci vybraných knihoven.

V této práci jsou využité výše zmíněné nástroje k naprogramování řídicího (master) mikrokontroléru ESP32, jež zahrnuje vytvoření webového serveru, sbírání a zpracování dat od ostatních měřících zařízení a vytvoření fuzzy systému pro regulaci.

5.1.1 Smyčka programu a základní nastavení řídicího mikrokontroléru

Po zapnutí a startu řídicího mikrokontroléru se provede inicializace komponentů, senzorů a komunikace. Následně se načtou uložené hodnoty a nastavení z paměti zařízení a provede se registrace callback funkcí. Na konec se provede registrace všech HTTP metod, které budou následně sloužit pro funkci webového serveru, a nastaví se fuzzy systém.

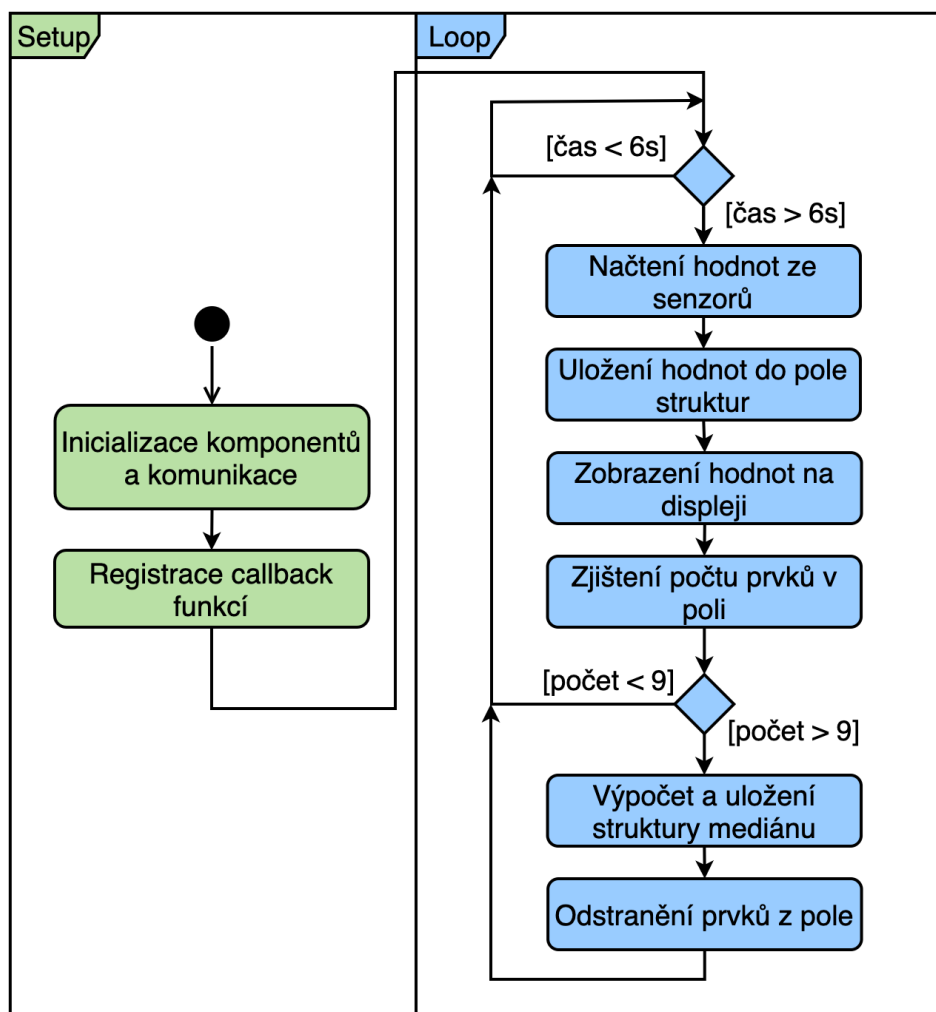


Obrázek 5.1: UML diagram programu řídicího mikrokontroléru

Program řídicího mikrokontroléru běží v nekonečné smyčce, kde každých 60 sekund požádá o naměřené hodnoty měřící mikrokontrolér. Tyto hodnoty následně zpracuje ve fuzzy systému a aktualizuje všechny hodnoty na webové stránce. Zároveň zašle výstupní hodnoty do ethernetového DA převodníku a zapíše všechny vstupní i výstupní veličiny do databáze.

5.1.2 Smyčka programu a základní nastavení měřícího mikrokontroléru

Po zapnutí a startu měřícího mikrokontroléru se provede inicializace komponentů, senzorů a komunikace a následně registrace všech callback funkcí.



Obrázek 5.2: UML diagram programu měřícího mikrokontroléru

Program měřícího mikrokontroléru běží v nekonečné smyčce, kde každých 6 sekund načítá hodnoty ze senzorů, tyto hodnoty ukládá do polí o velikosti 10. Jakmile se pole naplní maximálním počtem hodnot, program vypočítá medián těchto 10 hodnot. Medián se pak uloží do struktury hodnot, která je následně připravená k odeslání do řídicího mikrokontroléru.

5.1.3 Čtení dat ze senzoru a výpočet mediánu

Pro čtení dat ze senzorů byla použita open source knihovna `SparkFun_SCD30_Arduino_Library.h`, která umožňuje komunikaci se senzorovým modulem Sensirion SCD30 přes sběrnici I2C a čtení dat z tohoto modulu.

Senzorový modul je po připojení na sběrnici dostupný na adrese 0x61. Čtení dat z tohoto modulu je díky použité knihovně velmi jednoduché a stačí na to následující kód.

```
if (airSensor.dataAvailable())
{
    co2Value = airSensor.getCO2();
    temperatureValue = airSensor.getTemperature();
    humidityValue = airSensor.getHumidity();
}
```

Listing 5.1: Získání naměřených dat ze senzoru

Vytvořená struktura pro ukládání hodnot ze senzorů obsahuje 4 prvky. Jeden `Int` pro uložení id měřicího modulu a tři stringy pro uložení hodnot ze senzorů. Vytvořená proměnná `myData` datového typu `struct_message` slouží jako zpráva, která obsahuje naměřené hodnoty a zasílá se na vyžádání do řídicího mikrokontroléru. Tato proměnná se přepisuje novými hodnotami každých 60 sekund.

```
typedef struct struct_message {
    int sensorId = 0;
    String humidity = "0";
    String temperature = "0";
    String CO2 = "0";
} struct_message;

struct_message myData;
```

Listing 5.2: Struktura dat

Jak je již zmíněno výše, medián hodnot má zde funkci eliminace případných nepřesností v měření. Pro získání mediánu je třeba seřadit prvky v poli a získat prostřední hodnotu. V tomto případě byl pro seřazení využit algoritmus bubble sort, který seřadí hodnoty v poli. Jelikož je počet prvků v poli sudý, získáme požadovaný medián vypočtením průměru 5 a 6 prvku v poli.

5.1.4 Komunikace mezi měřícím a řídicím mikrokontrolérem

Pro komunikaci mezi jednotlivými mikrokontroléry je použita knihovna `esp_now.h`, která umožňuje komunikaci přes protokol ESP-NOW popsany výše. Tato knihovna umožňuje přiřadit programu tzv.

callback funkce, které se následně automaticky volají při přijetí dat nebo při zasílání dat jinému ESP.

Řídící mikrokontrolér zasílá v pravidelných intervalech požadavky na hodnoty. Při přijetí dat od tohoto mikrokontroléru se zavolá callback funkce `OnDataReceive`, která zkontroluje, zda-li se jedná o požadavek. A jestli ano, pošle nazpět strukturu naměřených hodnot.

```
void OnDataRecv(const uint8_t * mac_addr, const uint8_t *incomingData, int len) {
    // MAC adresa masteru
    char macStr[18];
    Serial.print("Paket přijat od: ");
    snprintf(macStr, sizeof(macStr), "%02x:%02x:%02x:%02x:%02x:%02x",
             mac_addr[0], mac_addr[1], mac_addr[2], mac_addr[3], mac_addr[4],
             mac_addr[5]);
    Serial.println(macStr);
    memcpy(&incomingMessage, incomingData, sizeof(incomingMessage));

    if (incomingMessage.equals("&Request")) {
        esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(
            myData));
        Serial.println(result == ESP_OK ? "Odesláno úspěšně" : "Chyba odeslání dat");
    }
}
```

Listing 5.3: Callback funkce `OnDataRecv`

5.1.5 Webový server

Webový server je místo, které ukládá, zpracovává a poskytuje webové stránky webovým klientům. Komunikace mezi klientem a serverem probíhá pomocí speciálního protokolu s názvem Hypertext Transfer Protocol (HTTP). V tomto protokolu klient zahájí komunikaci zasláním požadavku na konkrétní webovou stránku pomocí protokolu HTTP a server odpoví obsahem této webové stránky nebo chybovou zprávou, pokud nedokáže odpovědět. Stránky poskytované serverem jsou většinou dokumenty HTML.[22]

Webový server je v tomto systému umístěný na řídicím mikrokontroléru a pro jeho vytvoření je použita knihovna `ESPAsyncWebServer.h` a knihovna `AsyncTCP.h`. Poskytuje klientovi na vyžádání HTML a CSS soubory, uložené v SPIFFS mikrokontroléru. Zároveň umožňuje klientovi upravovat nastavení požadovaných hodnot.

5.1.6 Regulace pomocí fuzzy systému

Navržený fuzzy systém je převeden do programu za pomoci knihovny eFLL. Knihovna eFLL je standardní knihovna pro vestavěné systémy umožňující implementaci jednoduchých a efektivních Fuzzy systémů. Knihovna využívá fuzzy systém Mamdani a algoritmus max-min fuzzy kompozice. Pro defuzzyfikaci je použita metoda těžiště.

Pro umožnění uživatelského nastavení požadované teploty a CO₂ v místnosti, se před zpracováním odečte od naměřené hodnoty hodnota nastavená a tento rozdíl se poté zpracuje fuzzy systémem.

Výslednou defuzzyfikací získáváme výstupní hodnoty, které využijeme pro nastavení výstupního výkonu ventilace a klimatizace a také k monitoringu na webovém rozhraní.

```
FuzzyInput *teplota = new FuzzyInput(1);
FuzzySet *tnizka = new FuzzySet(-50, -50, -2, 0);
teplota->addFuzzySet(tnizka);
FuzzySet *tidealni = new FuzzySet(-1, 0, 0, 2);
teplota->addFuzzySet(tidealni);
FuzzySet *tvyssi = new FuzzySet(0, 2, 2, 5);
teplota->addFuzzySet(tvyssi);
FuzzySet *tvysoka = new FuzzySet(2, 5, 5, 8);
teplota->addFuzzySet(tvysoka);
FuzzySet *tvelmivysoka = new FuzzySet(5, 8, 30, 30);
teplota->addFuzzySet(tvelmivysoka);
fuzzy->addFuzzyInput(teplota);
```

Listing 5.4: Ukázka vytvoření funkcí příslušnosti pro vstupní teplotu

```
FuzzyRuleAntecedent *ifTeplotaTNizkaAndCo2CNizke = new FuzzyRuleAntecedent();
ifTeplotaTNizkaAndCo2CNizke->joinWithAND(tnizka, cnizke);
FuzzyRuleConsequent *thenVystupKlimatizaceKVubecAndVentilaceVVubec = new
    FuzzyRuleConsequent();
thenVystupKlimatizaceKVubecAndVentilaceVVubec->addOutput(KVubec);
thenVystupKlimatizaceKVubecAndVentilaceVVubec->addOutput(VVubec);
FuzzyRule *fuzzyRule01 = new FuzzyRule(1, ifTeplotaTNizkaAndCo2CNizke,
    thenVystupKlimatizaceKVubecAndVentilaceVVubec);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule01);
```

Listing 5.5: Ukázka vytvoření jednoho z pravidel

5.2 Ukládání historie stavů a naměřených hodnot

ESP32 disponuje 4MB flash pamětí, kterou lze využít pro ukládání malého množství dat. Přistupovat do této flash paměti lze dvěma způsoby: pomocí knihovny „Preferences.h“ a nebo pomocí souborového systému SPIFFS. Knihovna preferences umožňuje uložení hodnot jednotlivých proměnných a následně jejich načtení např. po restartu nebo po výpadku napájení. Je vhodná například pro uložení posledního stavu proměnné, uložení nastavení nebo jakéhokoli jiného datového typu, který je potřeba trvale uchovat. SPIFFS je lehký souborový systém vytvořený pro mikrokontroléry s flash čipem, který je připojen pomocí sběrnice SPI. Umožňuje přístup k paměti flash, ze které lze následně číst, zapisovat, zavírat a mazat soubory. SPIFFS nepodporuje adresáře, takže je vše uloženo v ploché struktuře. Použití SPIFFS je obzvláště užitečné pro uložení HTML, CSS a JavaScript souborů, obrázků a ikon či jiných konfiguračních souborů, které následně může využít webový server.

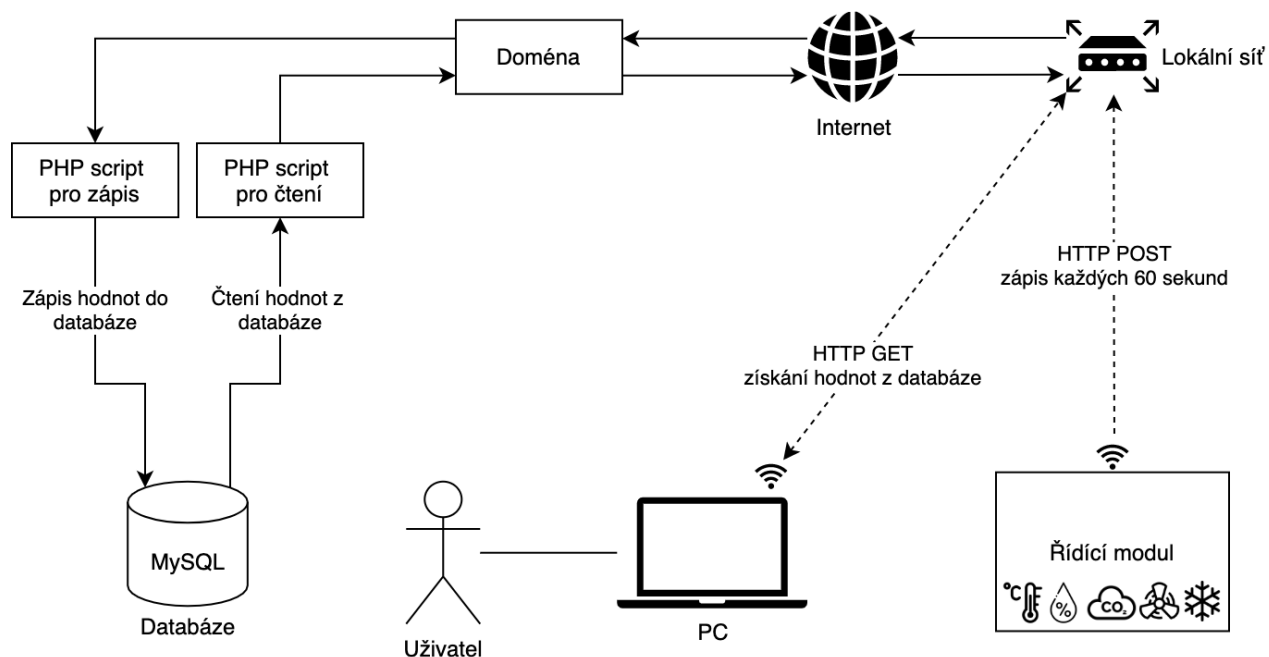
K ESP32 lze také připojit modul pro MicroSD kartu a rozšířit tak místo pro ukládání velkých souborů, které se nevejdou na vnitřní flash paměť. Modul využívá protokol SPI pro komunikaci s čipem a umožňuje tak čtení a zápis souborů na MicroSD kartu.

Alternativou, která je zároveň využita v této práci je externí databáze. Ta je ideálním, spolehlivým řešením pro ukládání historie stavů a naměřených hodnot. Pro tyto účely byl zvolen hosting společnosti ZONER software, který je pro účely testování zdarma a nabízí:

- 100MB FTP úložiště
- 100MB databázi MySQL
- PHP ve verzi 8.0 / 7.4

5.2.1 Založení domény a vytvoření databáze

Adresa domény byla zvolena „www.fliptomanec.php5.cz“. Po registraci a úspěšném přihlášení do administrace byla vytvořena databáze s názvem „esp32log“. Hosting disponuje softwarem pro správu databází phpMyAdmin. Pro ukládání dat do databáze byla vytvořena jedna tabulka s názvem „SensorData“. Tabulka obsahuje sloupce pro vkládání naměřených hodnot teploty, vlhkosti a CO₂ z každé místnosti a také jednotlivé hodnoty výstupu ventilace a klimatizace v daný čas. Pro vkládání a čtení dat z této tabulky byly vytvořeny dva PHP skripty, které obsahují databázové dotazy vykonávající danou funkci. Skript pro výpis dat z tabulky obsahuje navíc parametr, který umožňuje vypsat hodnoty za určené hodinové rozmezí.



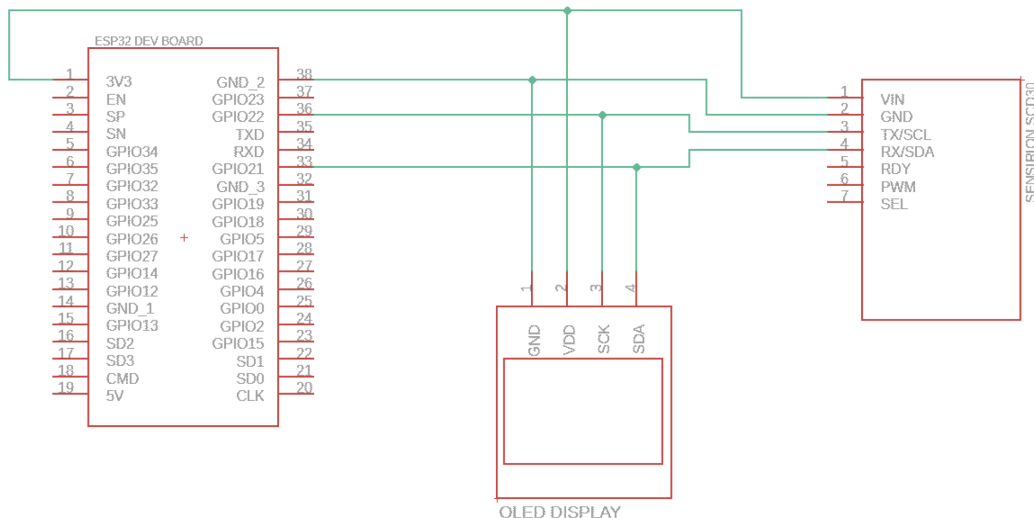
Obrázek 5.3: Schéma komunikace s databází

Tabulka 5.1: Vytvořená databázová tabulka a její atributy

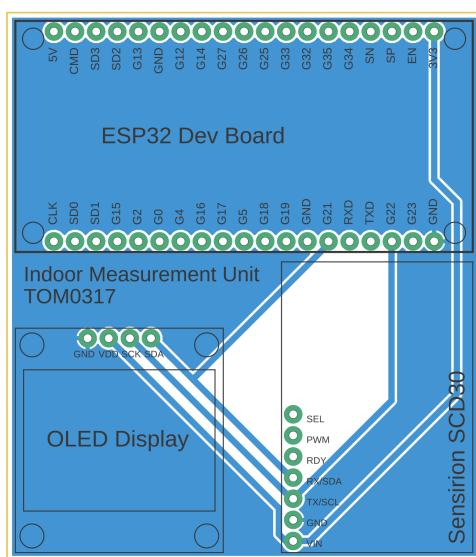
| Název | Datový typ |
|--------------------------|-------------|
| id | int(6) |
| temperature_1 | varchar(10) |
| humidity_1 | varchar(10) |
| co2_1 | varchar(10) |
| temperature_2 | varchar(10) |
| humidity_2 | varchar(10) |
| co2_2 | varchar(10) |
| temperature_3 | varchar(10) |
| humidity_3 | varchar(10) |
| co2_3 | varchar(10) |
| temperature_4 | varchar(10) |
| humidity_4 | varchar(10) |
| co2_4 | varchar(10) |
| air_conditioning_output1 | varchar(10) |
| air_conditioning_output2 | varchar(10) |
| air_conditioning_output3 | varchar(10) |
| air_conditioning_output4 | varchar(10) |
| ventilation_output1 | varchar(10) |
| ventilation_output2 | varchar(10) |
| ventilation_output3 | varchar(10) |
| ventilation_output4 | varchar(10) |
| reading_time | timestamp |

5.3 Návrh a realizace desky plošných spojů

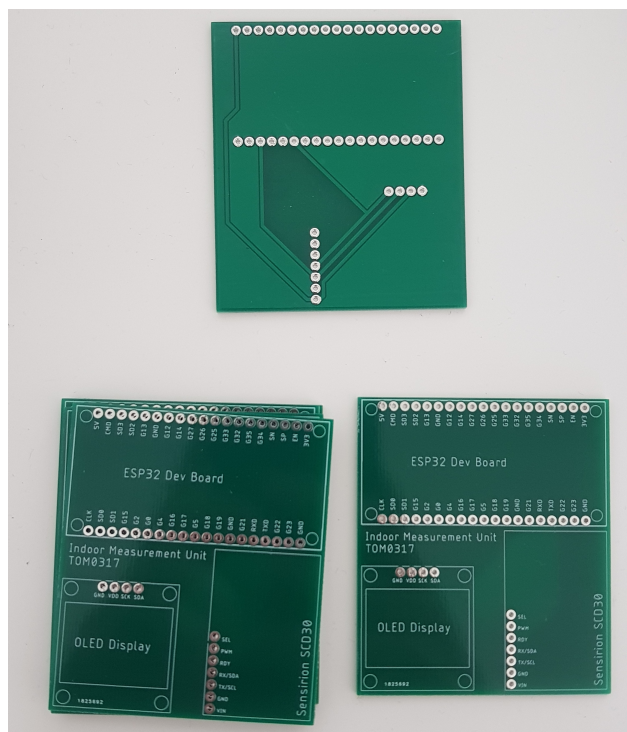
Deska plošných spojů byla navržena v softwaru Eagle. Jedná se o uživatelsky přívětivý a výkonný nástroj pro návrh desek plošných spojů. Obsahuje nástroje jako editor schémat, editor desky plošných spojů a knihovnu se součástkami. Pro účely práce byla v programu vytvořena vlastní knihovna obsahující používané součástky. Tyto součástky byly v editoru knihovny vytvořeny podle reálné předlohy a následně použity ve schématu zapojení.



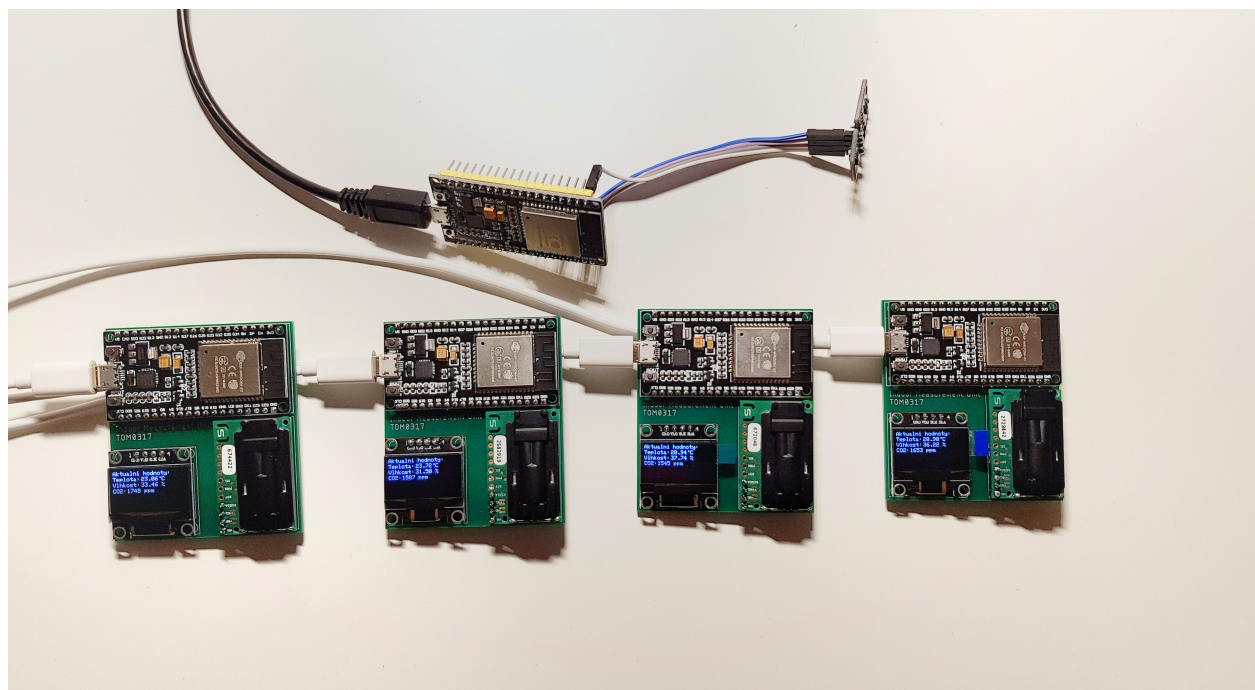
Obrázek 5.4: Schéma zapojení



Obrázek 5.5: Navržená DPS



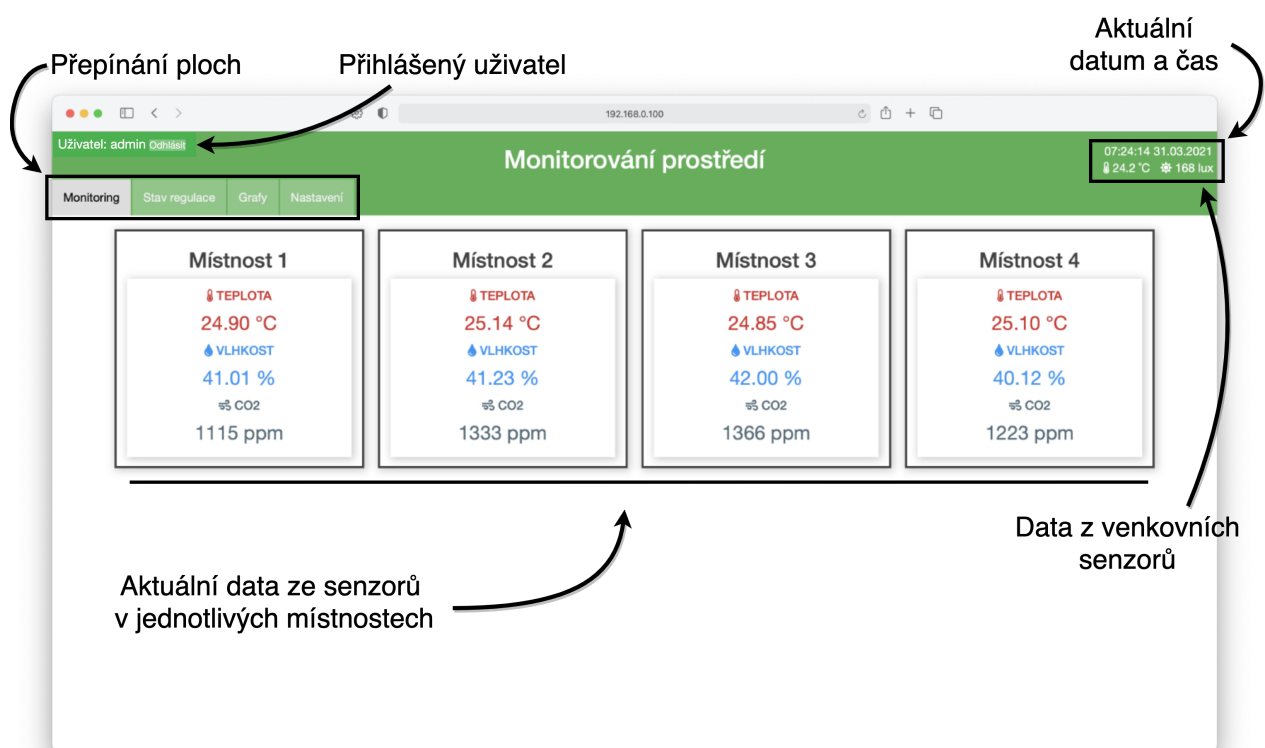
Obrázek 5.6: Realizované DPS dle vytvořeného návrhu



Obrázek 5.7: Foto výsledného systému

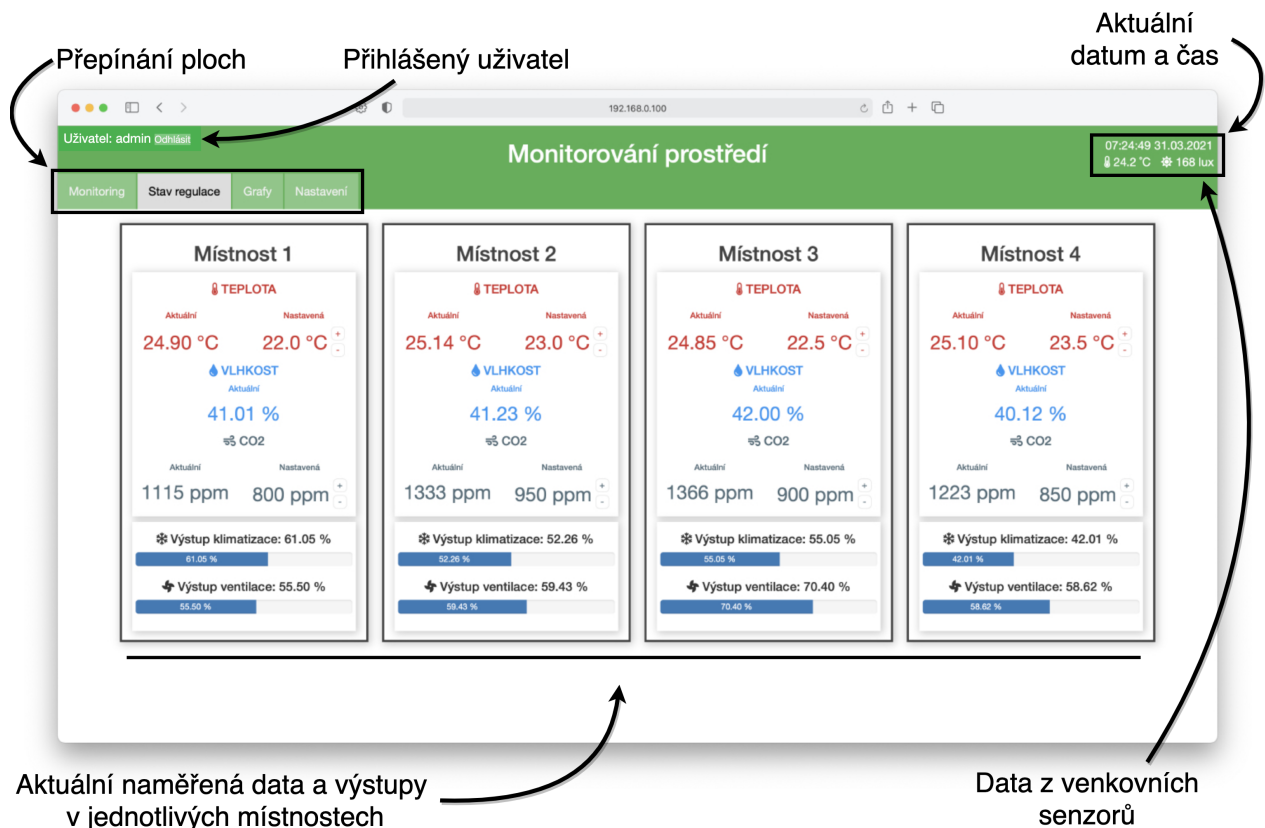
5.4 Uživatelské rozhraní pro monitorování a nastavení ventilace a klimatizace.

Uživatelské rozhraní je vytvořeno za pomoci jazyků HTML, CSS a JavaScript. Je rozděleno do 4 záložek (Monitoring, Stav regulace, Grafy, Nastavení). Rozhraní obsahuje možnost přihlášení administrátora pod jménem a heslem, který může po přihlášení vstoupit do všech záložek a měnit požadované hodnoty. Nepřihlášený uživatel má možnost vstoupit pouze na úvodní záložku „Monitoring“. Všechny záložky obsahují informace o přihlášeném uživateli, aktuální datum a čas, venkovní teplotu a intenzitu venkovního osvětlení. Záložka „Monitoring“ obsahuje informace o aktuálních naměřených hodnotách rozdělené do jednotlivých místností. Tato záložka je určena uživatelům, kteří nedisponují přihlašovacími údaji, ale chtějí sledovat informace o naměřených hodnotách v místnostech.

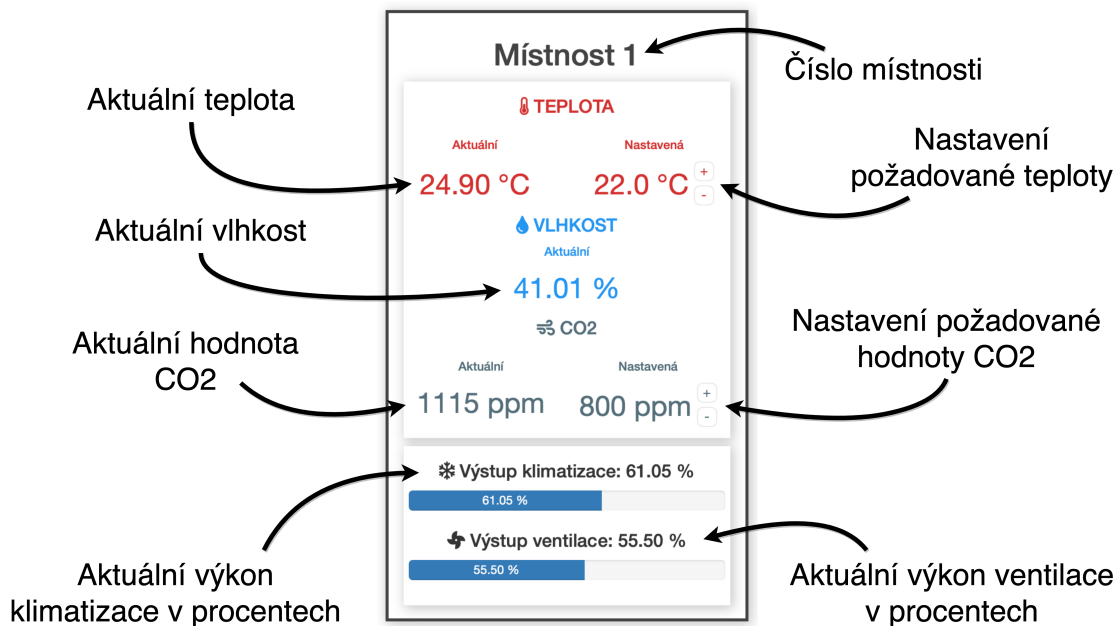


Obrázek 5.8: Popis úvodní obrazovky

Záložka „Stav regulace“ obsahuje stejně jako záložka „Monitoring“ informace o aktuálních naměřených hodnotách rozdělené do jednotlivých místností a zároveň jsou zde také umístěny ovládací prvky pro změnu požadované hodnoty teploty nebo CO₂. Také jsou zde umístěny jednotlivé ukazatele aktuálních výstupů klimatizace a ventilace.

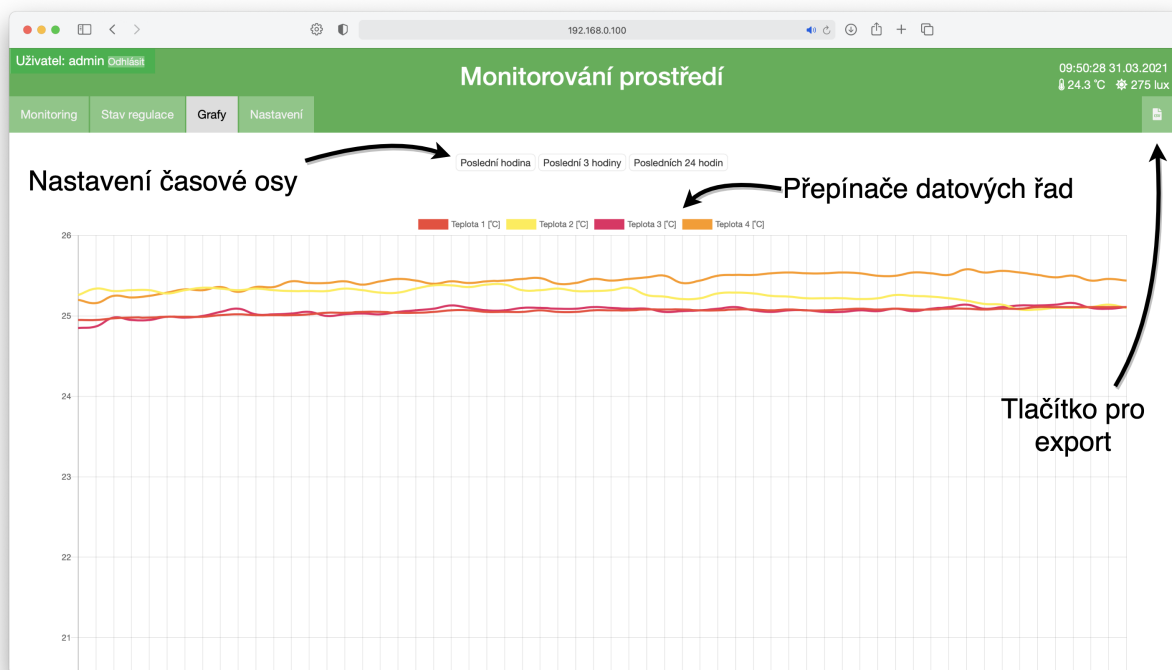


Obrázek 5.9: Obrazovka s ovládacími prvky, vstupními a výstupními hodnotami



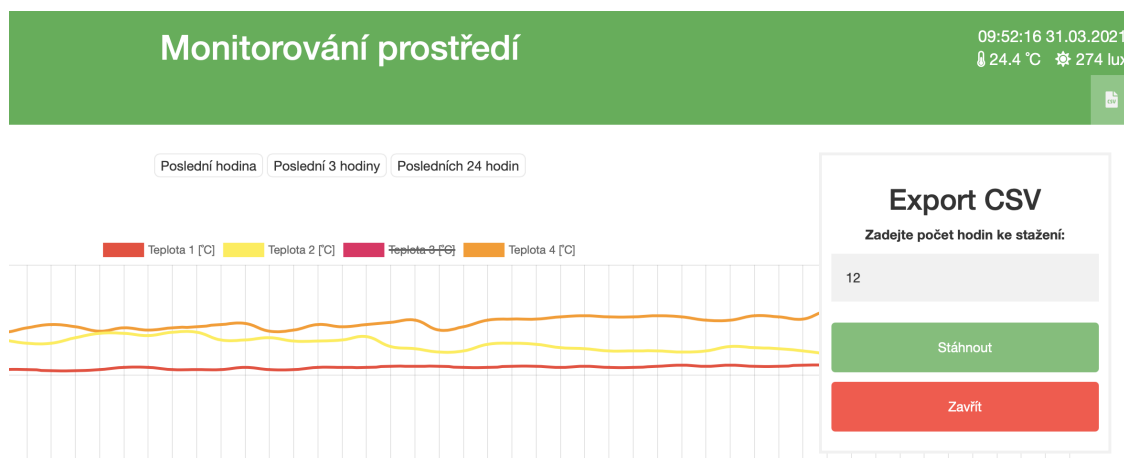
Obrázek 5.10: Podrobný popis ovládacího panelu jedné z místností

V záložce „Grafy“ jsou obsaženy pod sebou 3 grafy pro teplotu, vlhkost a CO₂. Grafy jsou vytvořeny pomocí open source knihovny Chart.js. Každý graf zobrazuje data ze všech čtyřech místností a je možné libovolné datové řady skrýt pomocí ovládacích prvků nad jednotlivými grafy.



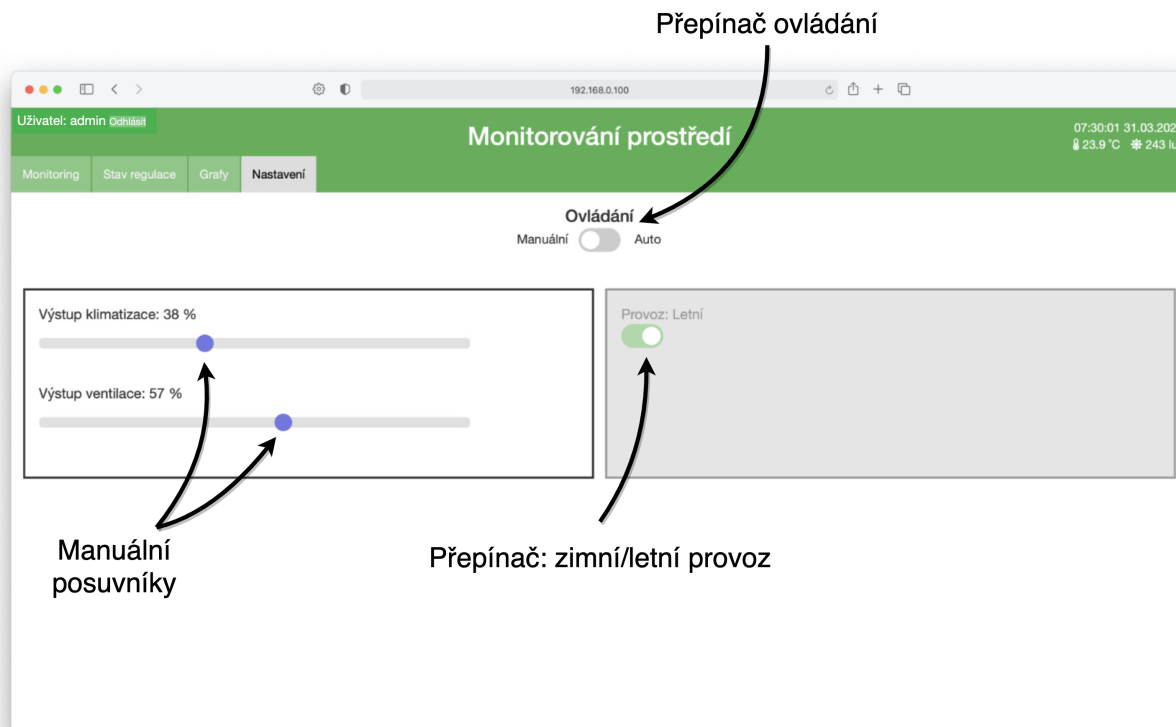
Obrázek 5.11: Obrazovka s grafy

Rozmezí časových os lze měnit přednastavenými ovládacími tlačítky. Přednastavené hodnoty jsou „Poslední hodina“, „Poslední 3 hodiny“ a „Posledních 24 hodin“.



Obrázek 5.12: Detail obrazovky s grafy - možnosti nastavení grafů, export dat

Na záložce „Grafy“ je také umístěno tlačítko pro export dat do souboru CSV. Po stisknutí tohoto tlačítka se zobrazí malé okno, ve kterém může uživatel zvolit počet hodin pro export dat. Po zadání požadovaného počtu hodin a stisknutí tlačítka „Stáhnout“ se zahájí stahování souboru s požadovanými daty.



Obrázek 5.13: Obrazovka s nastavením

Záložka „Nastavení“ obsahuje přepínač ovládání. Pomocí tohoto přepínače může uživatel jednoduše přepínat mezi automatickým chodem regulace a manuálním nastavením hodnot. Pokud jej zapne do automatického režimu, zobrazí se mu možnost přepínání mezi „Zimním“ a „Letním“ provozem. Pokud jej přepne do manuálního režimu, zobrazí se mu dva posuvníky, kterými může manuálně nastavit požadované hodnoty na výstupu.

Kapitola 6

Měření a analýza skutečných parametrů systému

Pro navržený a zkonstruovaný regulační systém bylo provedeno měření reakce systému a schopností regulace klimatizace a ventilace. Pro provedení bylo využito jednoho ze sensorových modulů, který byl umístěn do místnosti s výstupem ventilace a klimatizace. Výsledky z jednotlivých měření na systému jsou uvedeny v tabulkách níže. Zaznamenané naměřené hodnoty jsou hodnoty mediánů, vypočtené sensorovým modulem. V tabulkách jsou uvedeny nastavené hodnoty, aktuální hodnoty a hodnoty po jednotlivých minutových úsecích. Pro větší přehlednost je jedno z měření vykresleno také do grafu.

Tabulka 6.1: Měření reakce klimatizace

| Č. | NT [°C] | PT [°C] | PVK [%] | Teplota po [°C] | | | | Výstup klimatizace po [%] | | | | VT [°C] |
|----|------------|------------|------------|-----------------|-------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|------------|
| | | | | 5m | 10m | 15m | 20m | 5m | 10m | 15m | 20m | |
| 1 | 20 | 24,69 | 82,5 | 24,11 | 21,07 | 20,36 | 20,39 | 73,45 | 66,59 | 30,51 | 31,21 | 13 |
| 2 | 22 | 24,52 | 58,73 | 23,92 | 22,78 | 22,54 | 22,31 | 47,76 | 33,52 | 32,41 | 30,8 | 13 |
| 3 | 19 | 22,76 | 67,56 | 22,23 | 21,13 | 20,26 | 19,45 | 64,31 | 48,63 | 37,19 | 32,19 | 13 |
| 4 | 23 | 25,07 | 48,56 | 24,73 | 24,02 | 23,65 | 23,2 | 42,28 | 35,92 | 33,27 | 27,97 | 13 |
| 5 | 21 | 23,88 | 61,52 | 23,24 | 22,87 | 21,78 | 21,24 | 53,72 | 47,84 | 33,3 | 28,73 | 13 |

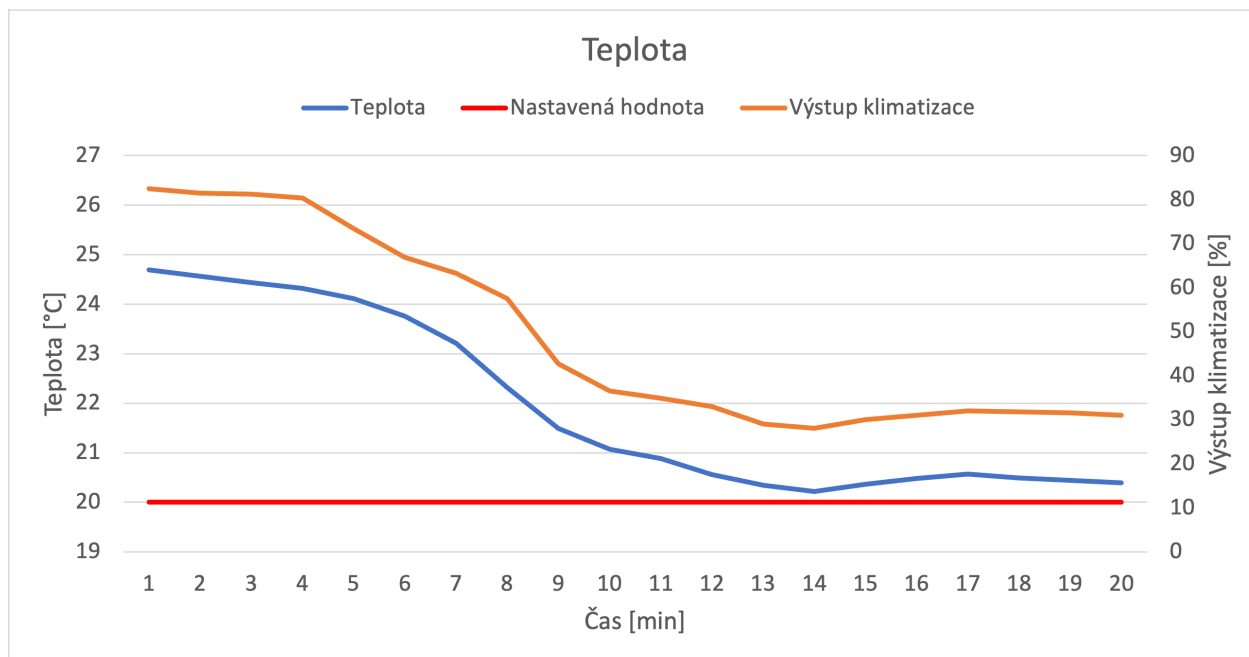
Č - Číslo měření

NT - Nastavená teplota

PT - Počáteční teplota

PVK - Počáteční výstup klimatizace

VT - Venkovní teplota



Obrázek 6.1: Graf měření reakce klimatizace

Na obrázku 6.1 je vykresleno první měření reakce klimatizace. Z vyobrazeného grafu lze vidět, že po 5 minutách běhu klimatizace byla hodnota teploty 24,11 °C a výpočet pro výstup klimatizace byl stále ještě více než 73 %. Po 10 minutách běhu klesla teplota v místnosti na 21,07 °C a výstup klesl na hodnotu 66,59 %. Po 15 minutách lze vidět, že teplota v místnosti klesla na hodnotu blízkou požadované hodnotě, díky tomu se snížila hodnota výstupu na 30,51 %. Z grafu lze vidět, že v následujících minutách provozu, teplota oscilovala okolo požadované hodnoty.

Tabulka 6.2: Měření reakce ventilace

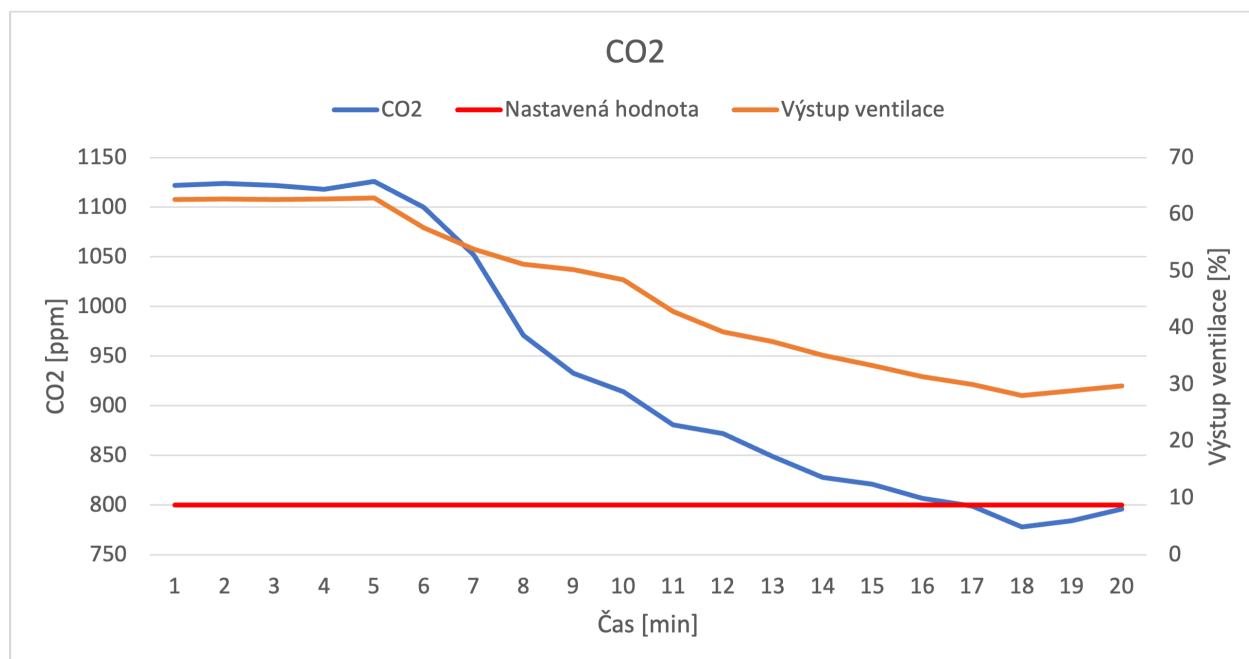
| Č. | NC | PC | PVV | CO2 po [ppm] | | | | Výstup ventilace po [%] | | | |
|----|-------|-------|-------|--------------|------|------|-----|-------------------------|-------|-------|-------|
| | [ppm] | [ppm] | [%] | 5m | 10m | 15m | 20m | 5m | 10m | 15m | 20m |
| 1 | 800 | 1122 | 62,65 | 1126 | 914 | 821 | 796 | 62,88 | 48,45 | 33,34 | 29,73 |
| 2 | 700 | 1034 | 63,13 | 987 | 849 | 788 | 732 | 52,9 | 43,69 | 37,11 | 34,42 |
| 3 | 600 | 989 | 65,43 | 974 | 909 | 823 | 712 | 58,45 | 55,34 | 49,17 | 42,13 |
| 4 | 900 | 1239 | 63,29 | 1198 | 1126 | 990 | 904 | 54,05 | 49,67 | 40,61 | 34,03 |
| 5 | 1000 | 1218 | 52,75 | 1176 | 1082 | 1024 | 997 | 44,43 | 40,67 | 34,37 | 34,03 |

Č - Číslo měření

NC - Nastavené CO₂

PC - Počáteční CO₂

PVV - Počíteční výstup ventilace



Obrázek 6.2: Graf měření reakce ventilace

Na obrázku 6.2 je vykresleno první měření reakce ventilace. Z vyobrazeného grafu lze vidět, že po 5 minutách běhu ventilace hodnota CO_2 mírně stoupla na 1126 ppm a výpočet pro výstup ventilace stoupl na hodnotu 62,88 %. Po 10 minutách běhu klesla hodnota CO_2 v místnosti na 914 ppm a výstup klesl na hodnotu 48,45 %. Po 15 minutách měření hodnota klesla, stejně jako u měření teploty, na hodnotu blízkou požadované hodnotě CO_2 a výstup ventilace se snížil na 33,34 %. V následujících minutách provozu hodnota CO_2 mírně klesla a následně oscilovala okolo požadované hodnoty.

Výsledný regulační systém reagoval na vstupní hodnoty okamžitě a požadované hodnoty bylo dosaženo během 20 minut spolehlivě.

Kapitola 7

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat řídicí systém pro regulaci ventilace a klimatizace v kancelářské budově s využitím fuzzy logiky. V úvodní části je popsána problematika kvality vzduchu, její kritéria a možnosti měření. Byl proveden také rozbor problematiky fuzzy rozhodovacího procesu.

Pro návrh a realizaci systému bylo využito 5 mikrokontrolérů, které byly rozděleny na jeden řídicí a čtyři měřicí moduly. Měřicí má na starost měření hodnot pomocí připojených senzorů a následné zpracování do podoby mediánu. Řídicí mikrokontrolér zajišťuje sbírání naměřených dat od ostatních měřicích modulů a následné řízení ventilace a klimatizace. Mimo jiné pohání webový server a také zajišťuje ukládání naměřených dat do databáze. Pro tuto práci byl zvolen mikrokontrolér ESP32, který byl naprogramován s využitím jazyka Wiring a open source knihoven. Komunikace mezi mikrokontroléry byla provedena pomocí protokolu ESP-NOW. Potřebný fuzzy systém pro regulaci byl navržen v programu Matlab a byl následně převeden do řídicího mikrokontroléru pomocí knihovny eFLL. Pro měření požadovaných veličin byl zvolen kalibrovaný senzorový modul Sensirion SCD30, který obsahuje NDIR CO₂ senzor a senzory pro měření teploty a vlhkosti. Pro použité komponenty, využívající sběrnici I2C, byla vytvořena deska plošných spojů. Pro monitoring a ovládání systému bylo vytvořeno uživatelské webové rozhraní, které umožňuje uživateli sledovat naměřené a vypočtené výstupní hodnoty a nastavit požadované hodnoty jednotlivých místností.

Na závěr práce bylo provedeno měření a analýza reakcí regulačního systému. Výsledky měření ukázaly, že zhotovený systém reaguje na vstupní hodnoty okamžitě a požadované hodnoty bylo spolehlivě dosaženo během 20 minut.

Jako možné rozšíření práce se nabízí propojení systému s centrálním topením budovy a zajistit tím kompletní řízení teploty budovy, jak v letním, tak v zimním období.

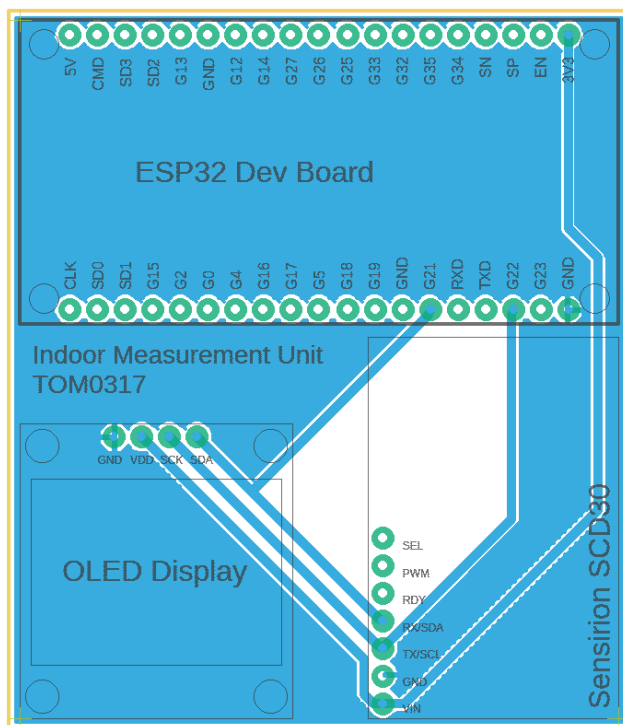
Literatura

1. *Výměna starých oken za těsná je změnou jejich funkce* [online] [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-skol/15625-vymena-starych-oken-za-tesna-je-zmenou-jejich-funkce%5C#XVYzGIg4SgA>.
2. HEMZAL, Karel. *Regulace klimatizace*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03907-6.
3. *Vlhkost vzduchu a hygiena prostředí* [online] [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/18142-vlhkost-vzduchu-a-hygiena-prostredi>.
4. *Pozor na koncentraci CO₂ v domácnosti – správné větrání je základ* [online] [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/bydleni/vetrani-1/pozor-na-koncentraci-co2-v-domacnosti-spravne-vetrani-je-zaklad.aspx>.
5. *CO₂ as indicator for the indoor air quality General principles* [online] [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/VIP/VIP%5C%2033_CO2%5C%20General.pdf.
6. *Vyhláška č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby*. [N.d.]. Č. č. 268.
7. *Pracujete ve zdravém prostředí? Měření oxidu uhličitého v budovách*. [Online] [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/5827-pracujete-ve-zdravem-prostredi>.
8. VOJÁČEK, Antonín. *Kvalita vzduchu v uzavřených místnostech - 8. Principy senzorů CO₂* [online]. 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/kvalita-vzduchu-v-uzavrenych-mistnostech-8-principy-senzoru-co2.html>.
9. *A study on NDIR-based CO₂ sensor to apply remote air quality monitoring system*. 1. vyd. Fukuoka, Japan: IEEE, 2009. ISBN 978-4-907764-34-0.
10. KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
11. JOKL, Miloslav. *Vlhkost vzduchu v interiéru budov: doporučený standard technický*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2000.

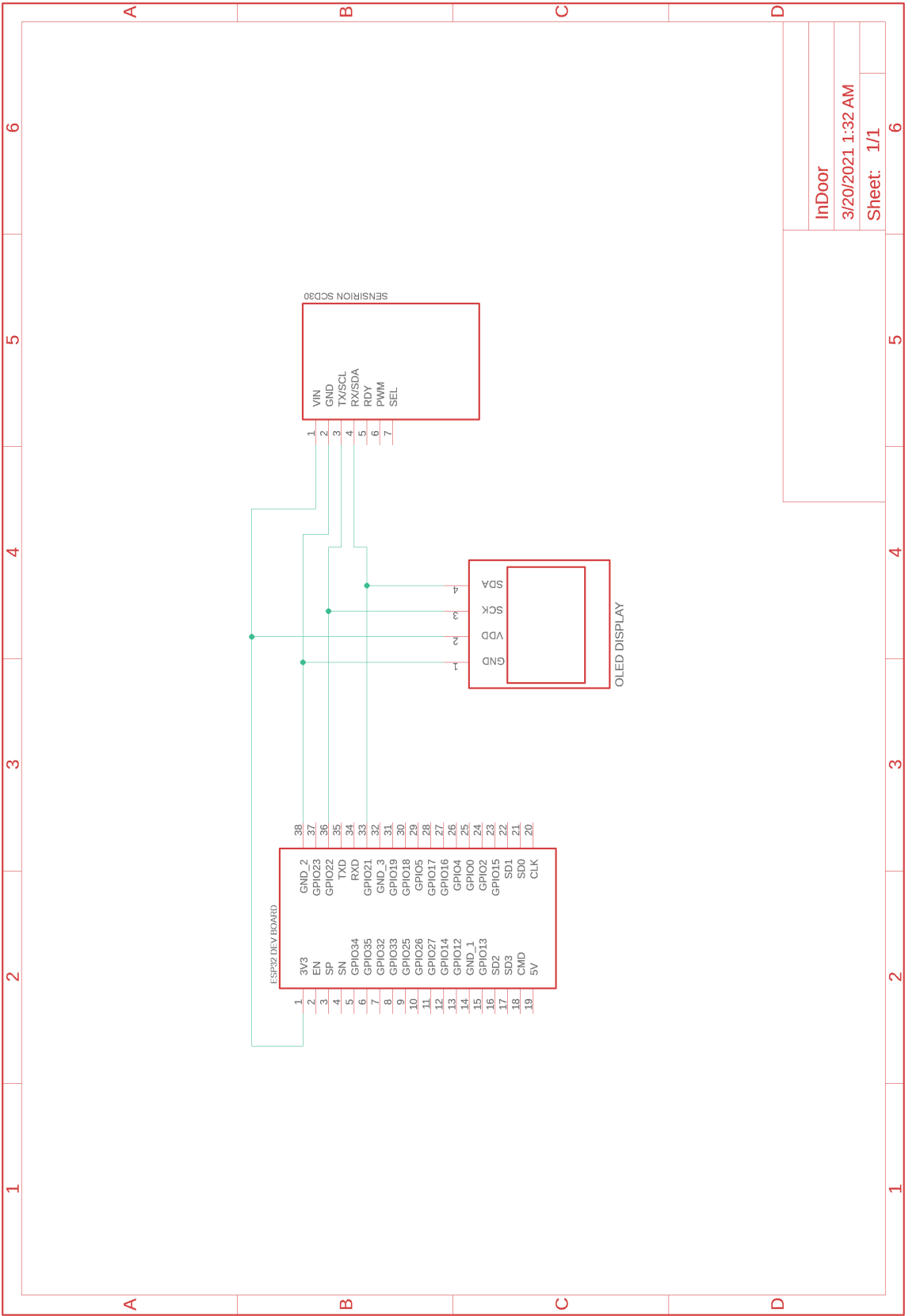
12. JURA, Pavel. *Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování*. Vydání první. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUTUM, 2003. ISBN 80-214-2261-0.
13. KURNIAWAN, Agus. *Internet of Things Projects with ESP32*. Birmingham: Packt Publishing Ltd., 2019. ISBN 978-1-78995-687-0.
14. *Datasheet Sensirion SCD30 Sensor Module: CO2, humidity, and temperature sensor*. 2020. Dostupné také z: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.5_CO2/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf.
15. *128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller*. [N.d.]. Dostupné také z: <https://drive.google.com/file/d/0B4B30jzMyzG80G12WUdHZmd3ZTA/view>.
16. *HTU21D(F) Sensor: Digital Relative Humidity sensor with Temperature output*. 2013. Dostupné také z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1899-HTU21D.pdf>.
17. *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC*. [N.d.]. Dostupné také z: <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>.
18. MATOUŠEK, David. *Udělejte si z PC - generátor, čítač, převodník, programátor*-. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2001. ISBN 80-730-0036-9.
19. *Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877* [online]. 2000 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbornice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>.
20. *ESP-NOW* [online] [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/software/esp-now/overview>.
21. *Getting Started with ESP-NOW (ESP32 with Arduino IDE)* [online] [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/esp-now-esp32-arduino-ide/>.
22. *Create A Simple ESP32 Web Server In Arduino IDE* [online] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/creating-esp32-web-server-arduino-ide/>.

Příloha A

Schéma zapojení a deska plošných spojů



Obrázek A.1: Deska plošných spojů



Obrázek A.2: Schéma zapojení

Příloha B

Seznam externích příloh

- **Složka web_server** - obsahuje ve složce „src“ zdrojový kód řídicího mikrokontroléru a fuzzy systému a ve složce „data“ zdrojové soubory pro webový server
- **Soubor new_sender_display.ino** - obsahuje zdrojový kód měřicího mikrokontroléru
- **Soubor Fuzzy regulace.fis** - obsahuje navrženou fuzzy regulaci v programu Matlab
- **Složka Eagle** - obsahuje schéma zapojení, desku plošných spojů a knihovnu se součástkami z programu Eagle
- **Soubor esp-data-withParameter.php** - obsahuje script pro zobrazení dat z databáze
- **Soubor post-esp-data.php** - obsahuje script pro uložení dat do databáze